

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Návrh přípravků pro dynamometr Kistler
Proposal of Fixtures for Dynamometer Kistler

Student:
Vedoucí bakalářské práce:

Vojtěch Blaženec
Ing. Kratochvíl Jiří, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání bakalářské práce

Student: **Vojtěch Blaženec**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Návrh přípravků pro dynamometr Kistler**
Proposal of Fixtures for Dynamometer Kistler
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor problematiky měření sil.
3. Představení a možnosti měření sil s dynamometrem Kistler 9129A.
4. Návrh přípravků pro upnutí dynamometru na strojové vybavení katedry.
5. Experimentální úloha, zpracování naměřených dat.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
[2] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
[3] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové (bakalářské) práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 13. 5. 2016

Vojtěch Bloženec

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uloženu vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 13. 5. 2016

Vojtěch Blaženec

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Vojtěch Blaženec

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Kledenského 40, Fulnek, 742 45

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BLAŽENEC, V. Návrh přípravků pro dynamometr Kistler: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2016, 49s. Vedoucí práce: Kratochvíl, J.

Tématem bakalářské práce je navržení upínacích přípravků pro nově zakoupené měřicí zařízení Kistler. Obsahem práce je teoretická část zabývající se seznámením s problematikou měření složek řezné síly a rozdělením již existujících dynamometrů. Následuje oddíl věnovaný dynamometru fy. Kistler, jenž byl použit pro experiment měření a návrhem přípravků pro jeho upnutí. Závěrečnou kapitolou je samotný experiment a jeho zhodnocení. Součástí bakalářské práce je i kompletní výkresová dokumentace k navrženým upínacím přípravkům.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

BLAZENEC, V. Proposal of Fixtures for Dynamometer Kistler: *thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Working, Assembly and Engineering Metrology, 2016, 49p. *Thesis head:* KRATOCHVÍL, J.

Theme of the Thesis is a proposal of Fixtures for new a purchased Kistler measuring device. Content of this project is theoretical part, in which concerns of an issue a measurement of cutting forces and a dividing of a existing Dynamometers. Further section is focused on a Dynamometer by Kistler, that was used for a measurement experiment and a design of Fixures. Concluding chapter is consisted of an itself experiment and its assessment. To the Thesis is enclosed a whole drawing documentation of the designed Fixtures.

Obsah

	strana
Úvod	9
1. Teoretický rozbor problematiky měření sil	10
1.1. Řezná síla.....	10
1.2. Složky řezné síly při soustružení.....	10
1.3. Nepřímé měření sil a momentů	12
1.4. Přímé měření sil a momentů.....	12
1.5. Požadavky kladené na dynamometry	13
1.6. Základní rozdělení dynamometrů	13
1.7. Typy dynamometrů	14
1.7.1. Mechanické dynamometry	14
1.7.2. Hydraulické dynamometry	14
1.7.3. Pneumatické dynamometry	15
1.7.4. Elektrické dynamometry	15
2. Piezoelektrické materiály	20
2.1. Krystalické piezoelektrické materiály.....	20
2.2. Keramické piezoelektrické materiály	21
2.3. Piezoelektrické polymery	22
3. Piezoelektrický jev	22
4. Dynamometr KISTLER 9129A.....	23
4.1. Měřicí řetězec	25
4.2. Možnosti měření řezných sil	26
5. Upínací přípravky pro soustružnické nože	27
5.1. Upínací přípravky firmy Kistler	27
5.2. Upínací přípravky navržené katedrou	29
5.2.1. Přípravek pro nožové hlavy univerzálních soustruhů	30
5.2.2. Přípravek pro DMG MORI NLX 2500MC/700	31
6. Experiment	32
6.1. Pomůcky použité při experimentu.....	33
6.1.1. Stroj.....	33
6.1.2. Nástroj a vyměnitelná břitová destička	34
6.1.3. Obrobek.....	35
6.1.4. Dynamometr Kistler 9129A.....	36
7. Průběh experimentu	36

7.1.	Obrábění řeznou rychlostí $v_c=100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	36
7.2.	Obrábění řeznou rychlostí $v_c=125 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	37
7.3.	Obrábění řeznou rychlostí $v_c=160 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	39
7.4.	Obrábění řeznou rychlostí $v_c=200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	40
8.	Shrnutí silového působení	42
	Závěr.....	46
	Citace.....	47
	Seznam příloh.....	49

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Popis	Jednotka
a	Vzdálenost mezi deskami	[mm]
a_p	Hloubka záběru	[mm]
C	Kapacita kondenzátoru	[F]
ε	Dielektrická konstanta	[-]
f	Posuv	[mm]
F	Výsledná síla obrábění	[N]
F_c	Hlavní složka řezné síly působící v ose Z	[N]
F_f	Axiální složka řezné síly působící v ose X	[N]
F_{ok}	Okamžitá velikost řezné síly	[N]
F_p	Radiální složka řezné síly působící v ose Y	[N]
K_p	Piezoelektrická konstanta	[-]
l	Délka vodiče	[m]
M_x	Kroutící moment v ose X	[N·m]
M_y	Kroutící moment v ose Y	[N·m]
M_z	Kroutící moment v ose Z	[N·m]
P	Odpor vodiče	[Ω]
$P_{už}$	Užitkový výkon	[W]
Q	Velikost elektrického náboje	[C]
R	Řezný odpor	[N]
Re	Mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
S	Plocha desek	[mm ²]
t	Doba řezání	[min]
T	Trvanlivost nástroje	[min]
VB_{Bmax}	Opotřebení hřbetu nástroje maximální	[mm]
VBD	Vyměnitelná břitová destička	[-]
v_c	Řezná rychlost obrábění	[m·min ⁻¹]

Úvod

Vývoj vědy a techniky je v dnešní době neustále posouván kupředu. S tím souvisí i zavedení různých experimentálních metod měření řezných sil, či jiných parametrů ovlivňující proces obrábění. Vývoj těchto technologií je podmíněn neustálým snižováním výrobních nákladů za zvýšení produktivity práce. To je možné jen při dokonalé znalosti všech faktorů, které významným způsobem ovlivňují obráběcí proces. Informace nezbytné k posouzení faktorů během obráběcího procesu, jako je např. trvanlivost či životnost nástroje, tvorba třísky atd., lze získat mnoha způsoby. Můžeme vypočítat teoretické hodnoty řezné síly, trvanlivosti nástroje a dalších veličiny, které by nás mohly zajímat. Další možností je použití simulačního programu. V dnešní době existuje řada simulačních software, které dokáží věrně nasimulovat podmínky obrábění. Pro velké množství vstupních hodnot, které jsou potřeba k bezproblémovému pracování simulačního programu se z tohoto měření stává časově velmi náročná záležitost. Nejpřesnějším, ale také velice zdlouhavým řešením jsou praktická měření. Experimentálním měřením získáme reálná data, která se sice každým měřením mohou mírně lišit, ale i přesto získáme přesnější hodnoty než teoretickými výpočty, či simulací. Praktické řešení můžeme provádět několika způsoby. Jedním z nich, je nepřímé měření výkonu na vřeteno stroje. Naměřené hodnoty se musí přepočítat, abychom získali požadovanou velikost řezné síly. Výhodou je nenáročnost na vybavení, ale výsledky budou spíše informativního charakteru. Mnohem přesnějším způsobem měření je měření přímo na stroji s pomocí různých dynamometrických měřidel, kterým se částečně zabývá i tato bakalářská práce. Obsahem této práce je seznámení s problematikou a nastínění základních způsobů měření složek řezné síly při procesu obrábění. Součástí je i návrh přípravků pro nově zakoupený piezoelektrický dynamometr Kistler a experimentální úloha, v níž byly pomocí dynamometru měřeny složky řezné síly. Znalost velikosti řezné síly nám pomáhá měřit a hodnotit obrobitelnost materiálů, s tím související trvanlivost, opotřebení řezného nástroje, vliv řezných kapalin na proces obrábění, atd. Dokonalé znalosti těchto oblastí nám napomáhají k určení optimálních pracovních podmínek, jež zajistí rovnováhu mezi hospodárností výroby a nízkými řeznými silami. Což je v technologii obrábění kovů hlavním úkolem.

1. Teoretický rozbor problematiky měření sil

1.1. Řezná síla

Řezná síla je dynamický jev. Síla nejdříve roste, až po určité maximum, kdy se ze základního materiálu začne oddělovat materiál ve formě třísek. Po oddělení třísky řezná síla poklesne a celý proces se opakuje. Znalost řezných sil při obrábění kovů má jak teoretický, tak praktický význam. Praktické poznatky se uplatňují především při konstruování nástrojů, výpočtech, či konstrukci obráběcích strojů. Teoretické znalosti řezných sil přispívají k upřesnění teorie o řezných procesech. Samotné měření složek řezné síly, se provádí pomocí dynamometrů různých druhů a konstrukcí. [5]

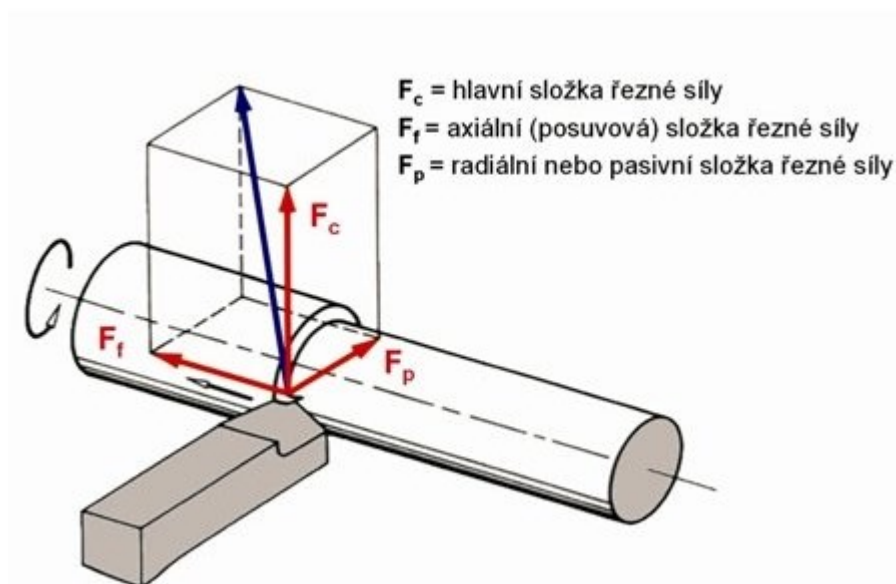
1.2. Složky řezné síly při soustružení

Řezná síla je silou, kterou působí nástroj na obrobek. Řezný odpor je naopak silové působení obrobku na nástroj. Při obrábění kovových materiálů je břit nástroje vtlačován velkou silou do materiálu obrobku. Aby došlo k oddělení materiálu ve formě třísky, musí řezná síla řezný odpor neustále překonávat. Přičemž platí podmínka rovnováhy (1):

$$F = - R \quad [N] \quad (1)$$

Výsledkem je opracovaný povrch, který musí splňovat dané kvalitativní požadavky. Jak již bylo zmíněno v úvodu, složky řezné síly úzce souvisí s obrobitelností materiálů. Velkou měrou se podílí na spotřebě energie při samotném obrábění. Velká řezná síla znamená velký výkon stroje, který je omezen parametry daného obráběcího stroje. Větší velikost řezné síly má za následek také větší deformace řezného nástroje i obrobku, což je nežádoucí. Výsledkem toho mohou být vibrace a deformace obrobku. To se nepříznivě projeví na kvalitě obrobeného povrchu a životnosti nástroje.

Geometrie nástroje je při zkoumání nesmírně důležitá, jelikož značně ovlivňuje velikost složek řezné síly. Při vnikání nástroje do materiálů dochází ke vzniku řezného odporu. Síly rozložené na celém břitu v axiálním směru, způsobují deformaci nástroje. To, že se nástroj deformuje, poznáme podle obrobeného povrchu, na němž se vyskytuje rozměrová chyba. Řezné síly a odpory nejsou během celého procesu obrábění stejné, což je viditelné i na naměřených výsledcích z experimentální úlohy. Tato změna je zapříčiněna např. opotřebením nástroje, změnou původních vlastností obráběného materiálu atd. Výslednou řeznou sílu můžeme rozdělit na 3 složky, což je zřejmé z obr. 1. [1, 5]



Obr. 1 - Schéma složek řezné síly [1]

F_f - axiální složka obráběné řezné síly (posuvná) - velikost této síly důležitá při dimenzování posuvných mechanismů obráběcího stroje [9]

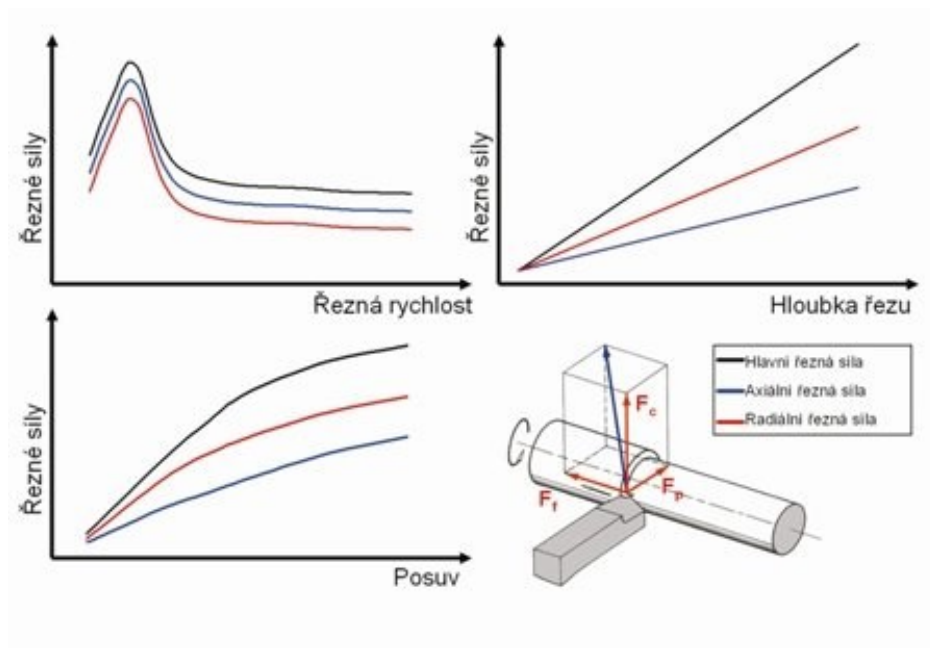
F_p - radiální složka řezné síly (kolmá k ose obrábění) - má vliv na průhyb součásti [9]

F_c - tangenciální složka řezné síly - leží ve směru hlavního pohybu, určuje velikost M_k a pomocí této složky určujeme výkon motoru [9]

Následně můžeme vypočítat výslednou řeznou sílu (2):

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad [\text{N}] \quad (2)$$

Mezi podílníky, které největším způsobem ovlivňují velikost složek řezné síly, patří zejména materiál obrobku, geometrie nástroje a použité řezné podmínky. Obráběný materiál řeznou sílu ovlivňuje největší měrou a platí zde jednoduché pravidlo: čím tvrdší obrobek, tím jsou složky řezné síly větší. To, jak nám jednotlivé faktory ovlivňují velikost složek řezné síly je zřejmé z obr. 2. [1]



Obr. 2 - Faktory ovlivňující velikost řezných sil [1]

1.3. Nepřímé měření sil a momentů

Nepřímé měření složek řezných sil vychází především z pozorování reakcí stroje během obráběcího procesu. Vychází se z výkonu elektromotoru. Nepřímým měřením je možné určit pouze tangenciální složku řezné síly, což je zřejmé ze vzorce pro výpočet užitečného výkonu (3):

$$P_{U\dot{z}} = F_c \cdot v_c \quad [\text{W}] \quad (3)$$

Podle tohoto vztahu lze snadno vypočítat tangenciální složku řezné síly. Výhodou této metody je nenáročnost na vybavení a lze ji použít u všech druhů obrábění, nicméně přesnost měření je spíše informativní. Nepřesnost měření je způsobena nuceným vynecháním zbývajících složek řezné síly, rozdílnou účinností stroje při zatížení a chodu naprázdno a dalšími faktory. [5]

1.4. Přímé měření sil a momentů

Přímé měření řezných sil a od nich se odvíjejících točivých momentů se provádí pomocí dynamometrů. Princip měření spočívá v měření deformací v soustavě stroj-nástroj-obrobek během obrábění. Dynamometr je přístroj, s jehož pomocí můžeme měřit dynamické síly, vznikající při třískovém obrábění. [12]

1.5. Požadavky kladené na dynamometry

- a) **Tuhost dynamometrů** je dána velikostí zatěžující síly F , která způsobí deformaci y . Velikost této deformace závisí na tvaru a provedení deformačního elementu – čidla, na celkovém konstrukčním provedení dynamometru i na použité měřicí metodě. Dostatečná tuhost dynamometru je zásadní při měření dynamickém. [15]
- b) **Citlivost dynamometrů** souvisí s citlivostí použité měřicí metody i s tuhostí konstrukčního provedení dynamometru. Dynamometr musí mít takovou citlivost, že nejmenší odečítaná jednotka při dodržení dostatečné přesnosti odečítaná odpovídala celkové hodnotě měřené veličiny. [15]
- c) **Stálost údajů dynamometrů** je závislá na tuhosti, citlivosti a přesnosti od stanovení nulové polohy až po zachycení údajů o sledované veličině, a to po celou dobu měření. [15]
- d) **Reprodukovatelnost údajů** dynamometrů úzce souvisí s výše uvedenými charakteristikami. [15]
- e) **Setrvačnost dynamometrů** závisí přímo úměrně na hmotnosti soustavy. Zejména při dynamických měřeních, kdy je nesmírně nutné sledovat jak skutečné hodnoty maximálních a minimálních hodnot měřené síly řezání, tak i její časový průběh, by měla být setrvačnost co možná nejmenší. [15]
- f) **Konstrukce dynamometrů** musí zajistit, aby se složky řezné síly vzájemně neovlivňovaly. [15]

1.6. Základní rozdělení dynamometrů

Dynamometry můžeme rozdělit do 3 skupin podle následujících aspektů:

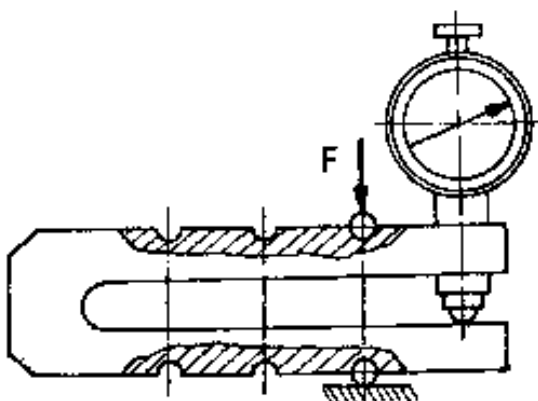
- a) **Podle počtu měřených složek řezné síly** – dynamometry jednosložkové, dvousložkové, třísložkové a pro měření kroutících momentů. [15]
- b) **Podle aplikované měřicí metody** (způsob přenosu působení síly z deformačního členu na indikační) – dynamometry mechanické, hydraulické, pneumatické, elektrické (indukční, kapacitní, odporové, využívající piezoelektrického jevu), optické atd. [15]
- c) **Podle metody obrábění** – dynamometry pro soustružení, frézování, vrtání, broušení, případně dynamometry univerzální. [15]

1.7. Typy dynamometrů

1.7.1. Mechanické dynamometry

Svou konstrukcí se řadí mezi nejjednodušší měřicí přístroje. Skládají se z kovového prstence nebo třmenu, úchylkoměru a z kovového válečku, na který v jeho podélné ose působí síla. Mezi výhody patří jednoduchá konstrukce a spolehlivost zařízení. Nevýhodou je malý rozsah měření, závislost na změně teplot, velká setrvačnost systému, díky němuž není možné mechanické dynamometry použít pro dynamická měření atd.

U mechanických dynamometrů se působení síly přenáší přímo nebo znásobené mechanickým převodem na měřicí prvek, jako je například číselníkový úchylkoměr. O velikosti síly se usuzuje z deformace siloměrných pružin, kroužků, třmenů, nosníků, membrán, případně podle hloubky vtlačení kuličky do materiálu o známé tvrdosti. Hlavními představiteli této skupiny dynamometrů jsou dynamometry třmenové dle obr. 3 pro zatížení do 10 000 N a dynamometry prstencové. [12, 15]



Obr. 3 - Mechanický dynamometr třmenový [12]

1.7.2. Hydraulické dynamometry

Podstatou hydraulických dynamometrů je přenos účinku měření síly nebo momentu na píst nebo membránu hydraulického obvodu, jejichž pohyb způsobuje změnu tlaku v kapalině. Tato změna je snímána pomocí manometru nebo jiného přístroje. Výhodou těchto dynamometrů je jednoduchá konstrukce a možnost měření více složek současně. Nevýhodou naopak nízká citlivost požadavky na dokonalé utěsnění systému a velká setrvačnost. [8, 12]

1.7.3. Pneumatické dynamometry

Princip je založen na dynamických vlastnostech vzduchu. Zatěžující síla působící na jedné straně pístu nebo membrány z pružného materiálu je vyvažována z druhé strany tlakem vzduchu. Toto působení protitlaku je snímáno manometrem a je přímo úměrné zatěžující síle. Snímací zařízení se skládá z utěsněné komory s ventilem. Vzduch je pod tlakem přiváděn do komory, dokud nedojde k rovnováze sil. Po dosažení této rovnováhy může být přečten údaj tlaku na tlakoměru. Předností je snadná obsluha a údržba, vysoká spolehlivost a citlivost v porovnání s elektrickými způsoby a relativně nízké náklady na pořízení a provoz. [12, 16]

1.7.4. Elektrické dynamometry

Jsou jedny z nejrozšířenějších a nejpoužívanějších v technické praxi. Mezi hlavní výhody elektrických dynamometrů patří:

- a)** snadný přenos dálkového signálu
- b)** možnost snímání signálů při rotujících a pohybujících se součástech
- c)** využití miniaturních měřících elementů
- d)** snadná dostupnost napájecích zdrojů a čistota provozu

Dle způsobu mechanicko-elektrické transformace rozlišujeme dva základní systémy elektrických dynamometrů:

- a)** systémy parametrické, které jsou založeny na změně jednoho parametru elektrického obvodu, L-indukčnosti, C-kapacity, R-odporu
- b)** systémy generátorové, které jsou založeny na vzniku proudu nebo napětí při deformaci elementů. Podstatou může být i mimo jiné piezoelektrický jev [12]

Elektrické dynamometry dále dělí na:

a) Elektrické dynamometry indukční

U těchto dynamometrů působí síla na elastický člen dynamometru. Výsledkem působení síly je deformace pružného členu, jenž změní polohu jádra v cívce, čímž dojde ke změně indukčnosti cívky. Tato změna odpovídá danému silovému zatížení.

b) Elektrické dynamometry kapacitní

U těchto dynamometrů se využívá pro měření velikosti deformace změny kapacity snímačů. Dochází zde k mechanicko-elektrické transformaci, jako u předchozí indukční metody. Ve většině případů se senzor skládá ze dvou proti sobě uložených, dielektrikem oddělených paralelních desek, tvořících kondenzátor, spojených s elastickým elementem. Nejjednodušším kapacitním snímačem je deskový kondenzátor, jehož kapacita C se dá stanovit dle vztahu (4):

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{a} \quad [\text{F}] \quad (4)$$

Pro experimentální studium dynamiky řezného procesu se však používá výhradně kapacitních snímačů pracujících s proměnnou vzdáleností mezi deskami či elektrodami. Mezi hlavní výhody této metody patří malá hmotnost a velká citlivost. Mezi nevýhody patří citlivost vůči okolním vlivům a náročnost na měřící techniku, proto se tento způsob měření používá jen zřídka. [15]

c) Elektrické dynamometry odporové

U elektrických odporových dynamometrů se využívá pro měření velikosti deformace změny odporu snímačů. Jedním z nejpoužívanějších typů snímačů je odporový tenzometrický dynamometr, který se svými vlastnostmi hodí pro velmi přesná měření. Princip je založen na měření změny ohmického odporu v závislosti na elastické deformaci kovových vláken tenzometru. Odporový tenzometr se deformuje spolu s deformačním elementem, neboť je s tímto elementem pevně spojen. [12]

Při měření deformace se využívá následujícího vztahu (5):

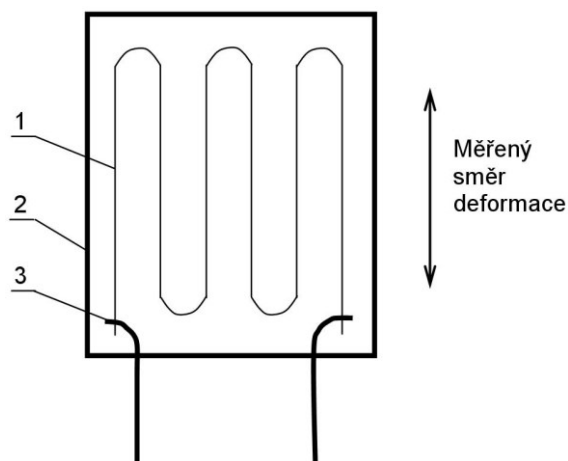
$$P = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad [\Omega] \quad (5)$$

Nejpoužívanějším odporovým materiálem u kovových tenzometrů je konstantan (slitina Cu-Ni) s velkým měrným odporem a hodnotou součinitele deformační citlivosti $k=2$. Podle technologie výroby se dělí kovové tenzometry na drátkové, fóliové a napařované. [12]

d) Drátkové tenzometry

Tento typ dynamometrů má měřící mřížku z odporového drátu o průměru 0,01 až 0,05 mm nalepenou na tenkou izolační podložku z papíru nebo z pryskyřice. K měřící mřížce

jsou připájeny měděné a postříbřené přívodní dráty. Drátkový tenzometr je potom přilepen na místo snímání deformace speciálním acetátovým nebo pryskyřicovým lepidlem. Měřicí mřížka může mít i tvar spirály, která je vetkaná do základového materiálu z umělého hedvábí nebo skleněné tkaniny. Odporový drátkový tenzometr je zobrazen na obr. 4. [8, 12]



Obr. 4 – Schéma drátkového tenzometru [3]
(1. drátek, 2. podložka 3. vodiče)

Drátkové odporové tenzometry mají malý rozptyl hodnoty odporu, součinitele deformační citlivosti i teplotních součinitelů. Tyto skutečnosti mají velký význam pro vyloučení rušivých vlivů při současném měření větším počtem tenzometrů. Z těchto důvodů je použití drátkových tenzometrů při dynamickém měření sil nejrozšířenější. [3,12]

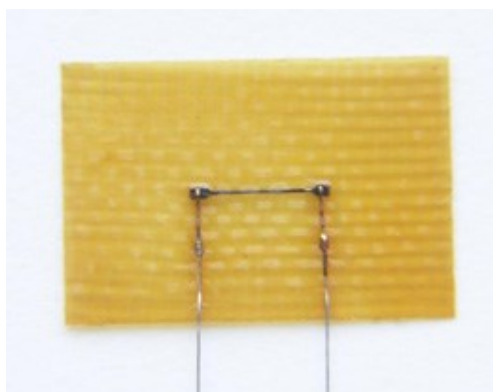
e) Fóliové tenzometry

Fóliové tenzometry se liší od drátkových tenzometrů technologií výroby. Měřicí mřížka je vytvořena z tenké fólie o tloušťce asi 0,012 až 0,015 mm. Požadovaný tvar měřicí mřížky je vyroben fotochemickou cestou, která je analogická metodě výroby tištěných spojů. Výhodou fóliových tenzometrů je jejich necitlivost vůči stranovým namáháním, poměrně velké přípustné zatížení proudové s ohledem na velké ochlazovací plochy a možnost vytvoření libovolného tvaru tenzometru. Fóliové odporové tenzometry se dále vyznačují dokonalejším spojením měřicí mřížky se základní fólií i lepšími podmínkami pro převod deformace na mřížku. Jsou proto v porovnání s odporovými tenzometry drátkovými přesnější a stabilnější. [12]

f) Polovodičové tenzometry

Postupem času se dospělo k vytvoření polovodičových tenzometrů (viz. obr.5). Tento druh tenzometrů je tvořen páskem vyříznutým z monokrystalu polovodiče (např. křemík, germanium). Mají až 60x větší citlivost oproti kovovým tenzometrům. Princip elektrických polovodičových tenzometrů je založen na piezoelektrickém jevu.

Polovodičové tenzometry rozlišují oblast použití odporové tenzometrie. Jejich výroba je ale velmi pracná a tedy i nákladná. S tímto bezprostředně souvisí i vysoké ceny těchto polovodičových tenzometrů. [15]



Obr. 5 – Polovodičový tenzometr [4]

g) Napařovací tenzometry

Další pomyslný stupeň v odporové tenzometrii představují tenzometry napařovací. Podstatou napařovacích odporových tenzometrů je postupné napařování jednotlivých vrstev přímo na měřené místo deformačního elementu. Napařování umožňuje vyrobit snímač velmi malých rozměrů a tloušťky. Postupuje se tak, že se na vyleštěné měřené místo nanáší postupně nejdříve vrstva izolační, potom vrstva pro spojovací a pájecí sekci a nakonec v požadovaném uspořádání vrstva odporová. Po dokončení se snímač pokryje ochrannou vrstvou. [15]

h) Piezoelektrické dynamometry

Piezoelektrické systémy měření síly jsou značně odlišné od jiných metod měření. Tento typ dynamometrů můžeme zařadit mezi nejpoužívanější zařízení detekující silové zatížení s širokým spektrem využití. Na stejném principu pracuje i dynamometr Kistler 9129A, který byl použit k experimentální úloze. Z tohoto důvodu se piezoelektrickému jevu věnují i následující kapitoly. Pro snímání deformace se využívá tzv. piezoelektrického

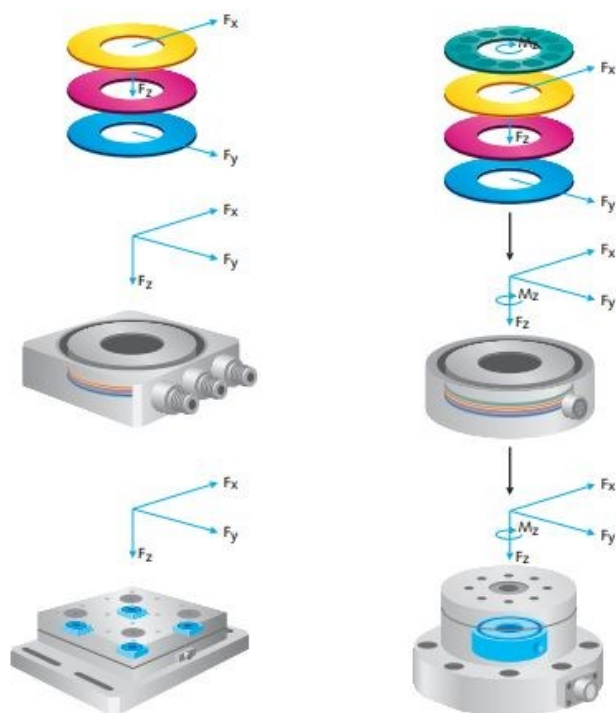
jevu, který je reakcí na silové zatížení. Podmínkou vzniku tohoto jevu je piezoelektrický materiál, kterým je např. křemen. Síly působící na krystal křemene jsou převedeny na proporcionální elektrický náboj. Velikost vzniklého náboje lze stanovit podle následujícího vztahu (6):

$$Q = k_p \cdot F \quad [C] \quad (6)$$

Tělo snímačů tvoří korozivzdorná část, do které jsou vloženy výbrusy z piezoelektrického materiálu. Základní piezoelektrický materiál a z něj zhotovené výbrusy, lze vidět na obr. 6. Každá tato komponenta pak snímá jednotlivé složky silového zatížení zvlášť. Počet vložených výbrusů v těle dynamometru se může lišit. Podle množství výbrusů rozlišujeme dynamometry jednokomponentní - měřící jednu složku zatížení a vícekomponentní - měřící více složek najednou, obr. 7. [15, 20]



Obr. 6 - Základní forma piezoelektrických senzorů [13]



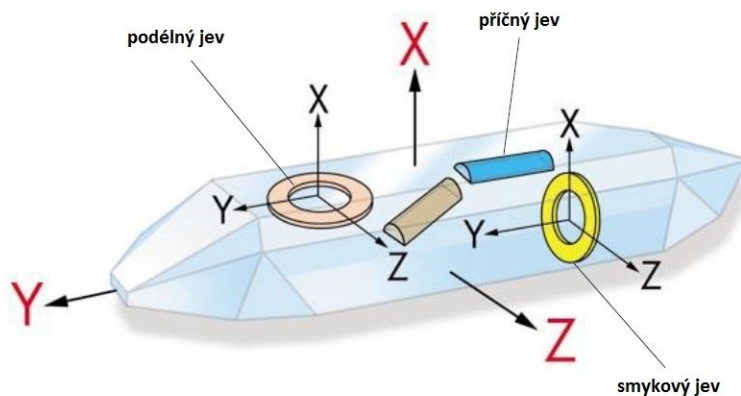
Obr. 7 – Konstrukce 3-komponentního (vpravo) a 4-komponentního dynamometru (vlevo) [6]

2. Piezoelektrické materiály

Průmyslové využití těchto materiálů se datuje od doby poválečné, tedy od poloviny minulého století. V současné době se vědci snaží o vývoj piezoelektrických materiálů s lepšími piezoelektrickými vlastnostmi, lepší tepelnou stabilitou, s větší účinností přeměny elektrické a mechanické energie atd. Piezoelektrické materiály používané v praxi lze rozdělit do 3 skupin.

2.1. Krystalické piezoelektrické materiály

Poznávacím znamením krystalů je jejich uspořádání atomů v krystalické mřížce. Hlavním představitelem je krystal křemene, který se objevuje jak v přírodní, tak i v syntetické formě. Základním rysem krystalů je jejich uspořádání atomů, iontů nebo molekul do krystalové mřížky. Díky svým vlastnostem se řadí mezi nejpoužívanější piezoelektrické materiály. Z krystalů jsou následně řezány a broušeny jednotlivé výbrusy. Před samotnou výrobou výbrusů je nutné zjistit pomocí rentgenového goniometru orientaci krystalových os viz obr. 8. Výbrusy z krystalu křemene jsou ukryty i uvnitř piezoelektrického snímače síly od firmy Kistler, který byl použit při provedeném experimentu. [18, 20]



Obr.8 – Orientace os u krystalu křemene [17]

2.2. Keramické piezoelektrické materiály

Historie keramickým piezoelektrických sahá až do 50. let minulého století. Za piezoelektrickou keramiku lze označit látky na bázi tuhých roztoků oxidů titanu, zirkonu a olova. Piezoelektrická keramika je vyráběna stejně jako např. vyměnitelné břitové destičky práškovou metalurgií. Poté je vše řezáno a broušeno do požadovaných tvarů, jak je vidět na obr. 9. Využití nachází tyto materiály především jako rezonátory v ultrazvukové technice. [2, 18, 20]



Obr. 9 – Rozmanitost tvarů keramických výbrusů [2]

2.3. Piezoelektrické polymery

Dalším zástupcem piezoelektrických materiálů jsou piezoelektrické polymery. Základním podmětem ke zkoumání těchto látek bylo objevení piezoelektrických vlastností v polymerní látce – polyvinylidendifluoridu a difluoropolyetylenu, koncem šedesátých let minulého století. Polymery vynikají oproti keramikám vyšší ohebností. Společně s elektrety se používají jako membrány mikrofónů. Objevují se také ve spojení s piezoelektrickými kompozity, kde je využito vlastností obou materiálů. Kompozity se nejčastěji připravují ve formě tyčinek, destiček či zrn piezoelektrické složky v polymerní matici. [18, 20]

3. Piezoelektrický jev

Historie zkoumání Piezoelektrického jevu je spojena s rokem 1880, kdy bratři Curieové prováděli experimenty na krystalech několika materiálů. Zjistili, že při mechanickém namáhání vykazují krystaly přímý piezoelektrický jev. O rok potvrdili existenci "obráceného jevu". [7, 20]

Původ slova pochází z řeckého piezein – tlačit. Je to schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformování. Vyskytuje se pouze u krystalů, které nemají střed symetrie. Nejznámější piezoelektrickou látkou je monokrystalický křemen, křišťál. Opačný jev, kdy se krystal ve vnějším elektrickém poli deformuje, se nazývá elektrostriktce. [11]

Díky piezoelektřině můžeme pomocí krystalů přeměnit mechanickou energii na elektřinu nebo naopak. Princip spočívá v tom, že na plochách určitých krystalů se po jejich mechanickém namáhání vytvoří elektrický náboj. Jestliže se toto na povrchu krystalu uskuteční, pak tuto změnu nazýváme přímý piezoelektrický děj. Platí zde přímá úměra, tzn. čím více krystal stlačíme, tím větší bude vygenerovaný náboj. . Velikost náboje je závislá pouze na velikosti ploch krystalu. V praxi se krystal stává druhem jakési malé baterie s pozitivním nábojem na jedné straně a negativním nábojem na opačné straně. Proud teče, pokud spojíme dvě plochy dohromady, tím získáme elektrický obvod.

V opačném případě nastane piezoelektrický efekt nepřímý. Ten je charakterizován tím, že je krystal mechanicky namáhán, až po zapojení napětí na protilehlých stranách krystalu. Na rozdíl od přímého elektrického jevu, kde je závislost lineární, je u nepřímého piezoelektrického jevu závislost kvadratická.

K piezoelektrickému jevu nedochází při působení vysokých teplot, jelikož dojde k narušení uspořádání iontů. K této změně dochází skokově, jedná se tedy o fázový přechod, kdy daný materiál nepřekročil kritickou teplotu a stále disponuje

piezoelektrickými vlastnostmi. Při překročení kritické teploty ztrácí materiál piezoelektrické vlastnosti. Kritická teplota identická pro každý materiál se nazývá Curieova teplota.

Piezoelektrický jev se hojně využívá i v běžném moderním životě. Své uplatnění si našel v oblasti lékařství (ultrazvuk...), bezpečnostní techniky (pohybová čidla, senzory...), elektrotechniky (mikrofony...), strojírenství (snímače, dynamometry...) a dalších oblastech techniky.

Poslední trend vývoje se zaměřuje především na piezoelektrické motory a různé typy aktuátorů, což je zařízení, zajišťující motoricky řízený lineární pohyb. Ty nacházejí uplatnění například v robotice, lékařství nebo v automatizaci. [20]

4. Dynamometr KISTLER 9129A

Výrobce dynamometru, který byl použit při experimentu, je firma Kistler, jež je světovou jedničkou oblasti dynamické měřicí techniky. Pro své zákazníky, vyvíjí technologie, založené na měření, které posouvá hranice fyzikálních zákonů. Jejich technologie měří tlak, sílu, zrychlení a točivý moment a jiné fyzikální veličiny. Produktová nabídka firmy se používá při vývoji motorů, monitorování vozidel, zpracování plastů a obrábění kovů, stejně jako u montážní a testovací techniky. Vyvíjí a dodává senzory, elektroniku a software, opírající se o celou škálu služeb.

Přesné označení použitého dynamometru je Kistler 9129A. Jedná se o modulární měřicí systém se širokým rozsahem měření až do 8kN. Řezný nástroj upnut na stacionárním dynamometru, který pracuje na základě piezoelektrického jevu. Tento typ dynamometru je konstruován pro měření řezných podmínek při soustružnických operacích, ale lze jej použít i na frézkách, vrtáčkách, bruskách...

Dynamometr se skládá ze čtyř 3-komponentních senzorů síly, které jsou namontovány pod vysokým předpětím mezi krytem a dvěma bočními základovými deskami. Umístění senzorů je viditelné na obr. 10. Výstupy čtyř senzorů jsou propojeny takovým způsobem, že, kromě konvenčního měření složek řezné síly lze měřit i velikost točivého momentu síly (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z). Tyto momenty se počítají ze složky síly. Díky speciálnímu upevnění senzorů, které jsou dostatečně tepelně izolovány, se dynamometr stává do značné míry necitlivý na teplotní vlivy. Výstupy čtyř integrovaných snímačů sil jsou předávány do 9-cestné zásuvky, do které je zapojen nábojový zesilovač. Dynamometr je odolný proti korozi a chráněn vůči pronikání chladicí kapaliny. Základní rozměry dynamometru jsou uvedeny na obr. 11. Technické parametry jsou vystiženy v tab. č. 1.

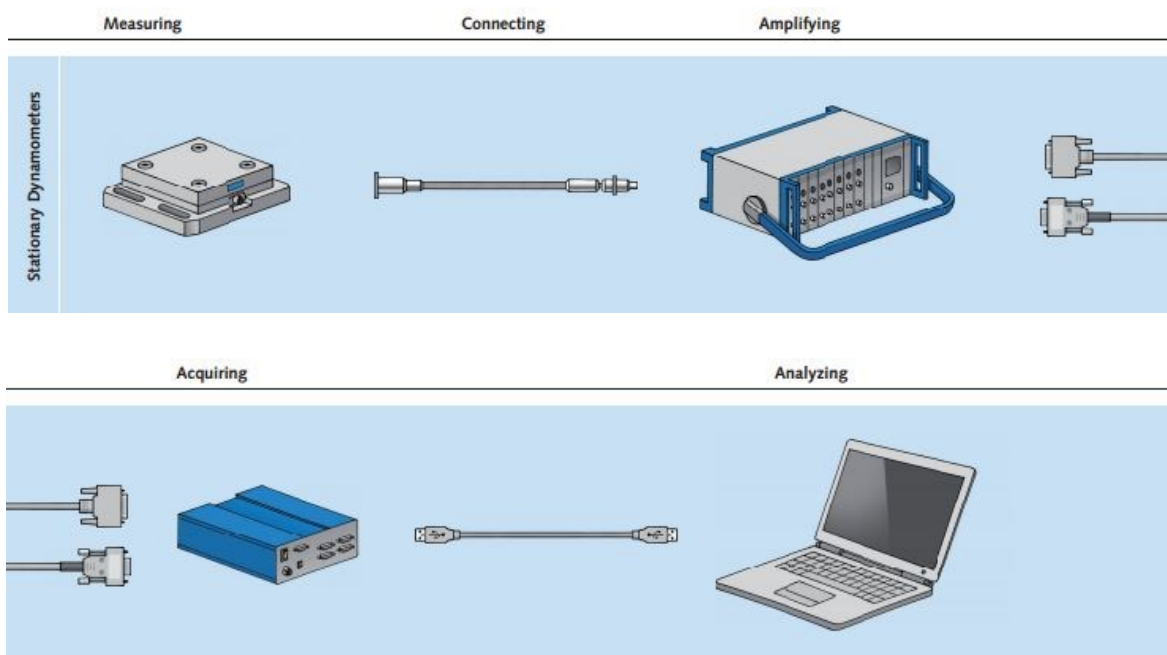
Tab. 1 – Technické parametry [14]

Technical Data			
Max. permitted measuring range (Type 9129AA mounted with adapter Type 9129AB50 or 9129AC6 or 9129AD25 or tool adapter Type 9129AE25, L = 35 mm)	F_x, F_z F_y	kN kN	-5 ... 5 -8 ... 8
Permitted measuring ranges (Type 9129AA mounted with remaining adapters)	F_x, F_y, F_z		see Fig. 1
Calibrated measuring range	F_x, F_z	kN	0 ... 5
	F_y	kN	0 ... 8
Calibrated partial meas. range	F_x, F_z	kN	0 ... 0,5
	F_y	kN	0 ... 0,8
Overload	F_x, F_y, F_z	%	20
Threshold		N	<0,01
Sensitivity (nominal)	F_x	pC/N	≈ 8
	F_y	pC/N	$\approx 4,1$
	F_z	pC/N	≈ 8
Sensitivity deviation dependent on the machine adapter	F_x, F_y, F_z	%	$\leq \pm 1$
Linearity, all ranges	F_x, F_y, F_z	$\pm \% \text{FSO}$	$\leq \pm 0,3$
Hysteresis, all ranges	F_x, F_y, F_z	$\% \text{FSO}$	$\leq 0,3$
Crosstalk	$F_z \rightarrow F_x, F_y$	%	$\leq \pm 3$
	$F_x \leftrightarrow F_y$	%	$\leq \pm 3$
	$F_x, F_y \rightarrow F_z$	%	$\leq \pm 3$
Natural frequency *	$f_n(x)$	kHz	$\approx 1,5$
	$f_n(y)$	kHz	$\approx 1,5$
	$f_n(z)$	kHz	$\approx 2,5$
Operating temperature range		°C	0 ... 70
Capacitance	F_x, F_y, F_z	pF	≈ 180
Insulation resistance		Ω	$> 10^{13}$
Ground isolation		Ω	$> 10^8$
Protection class EN60529			IP67
Weight	Dynamometer	kg	3,2
	Cover plate	kg	2,0
Mounting surface		mm	90x105
Connection		Fischer flange 9-pole neg.	

4.1. Měřicí řetězec

Jádrem měřicí aparatury je samotný dynamometr. Centrem pozornosti při konstruování byla spolehlivost systému. Zvláštní pozornost byla věnována izolaci tělesa dynamometru, vůči chladícím kapalinám a jiným druhům znečištění. Dynamometr i kabely jsou vybaveny zemnicí izolací, čímž je zaručen bezporuchový provoz. Další potřebnou komponentou je spojovací kabel. Ten zajišťuje spolehlivé propojení mezi dynamometrem a zesilovačem. Kabel je chráněn kovovým úpletem, díky kterému je dostatečně chráněn vůči hrubým podmínkám, které panují ve stroji při obrábění. Oba konce kabelu jsou opatřeny stabilními konektory s třídou ochrany IP67. Tento kabel je jednotný pro všechny dynamometry firmy Kistler. Dalším pomyslným článkem měřicího řetězce je již zmíněný

nábojový zesilovač. V tomto zařízení je měřený signál zesílen, zpracován a dále převeden na elektrické napětí, které je následně transponováno přes AD převodník na signál pro následné vyhodnocení v PC. Posledním krokem, k získání tolik potřebných výsledků měření je analyzující software DynoWare. V softwaru je možné si nastavit všechny parametry příslušného zesilovače, které jsou důležité pro získávání dat. Získané údaje jsou prezentovány v grafické podobě, spolu s různými funkcemi pro zpracování a analýzu signálu.



Obr. 12 – Měřicí řetězec [13]

4.2. Možnosti měření řezných sil

Dynamometr Kistler 9129A, je konstruován především pro měření řezných sil při soustružení. S tím souvisí i upínací přípravky, které jsou pro tento typ dynamometru k dostání. Jedná se výhradně o přípravky, které se upínají na revolverové hlavy soustruhu. Nicméně jak už bylo zmíněno, dynamometr lze použít i na jiné práce, kupříkladu pro frézovací, vrtací, hoblovací či jiné operace. Přípravky pro tyto operace, ke kterým není měřicí zařízení výhradně určeno, si řeší uživatel, v tomto případě Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie sama. Upnutí se uskutečňuje pomocí zhotovených přípravků, či upínek.

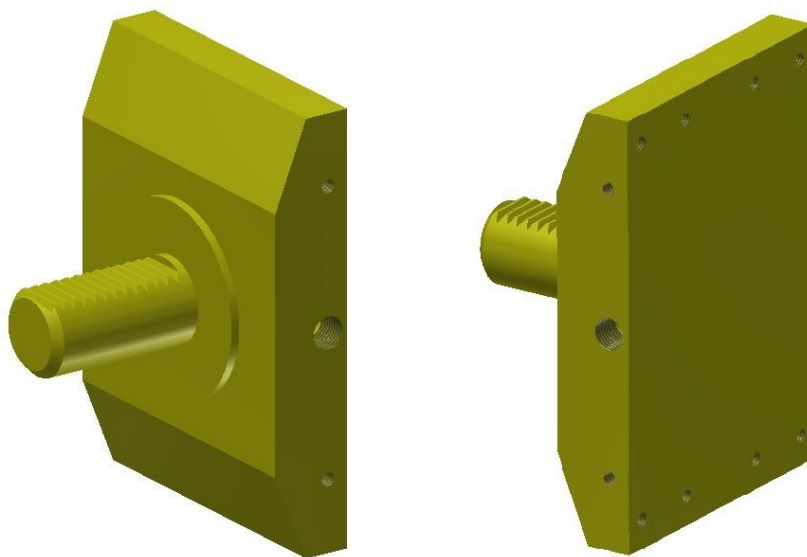
Dynamometr lze použít k měření řezné síly při podélném, příčném, vnějším i vnitřním soustružení. Rozdíl je pouze v upnutí soustružnického nože k tělesu dynamometru při jednotlivých druzích soustružení. Spolehlivé upnutí řezného nástroje se uskutečňuje pomocí různých upínacích přípravků.

5. Upínací přípravky pro soustružnické nože

Firma Kistler nabízí ke svým produktům celou škálu příslušenství. Výjimkou nejsou ani upínací přípravky, pomocí kterých upevníme dynamometr k revolverové hlavě, ale také nástrojové držáky, díky kterým upneme nůž na těleso dynamometru. Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie přípravky firmy Kistler bohužel nedisponuje, což je zapříčiněno především vysokou cenou těchto produktů. Z těchto důvodů se přistoupilo k návrhu vlastních upínacích přípravků, jež budou mít ve finále stejnou funkci.

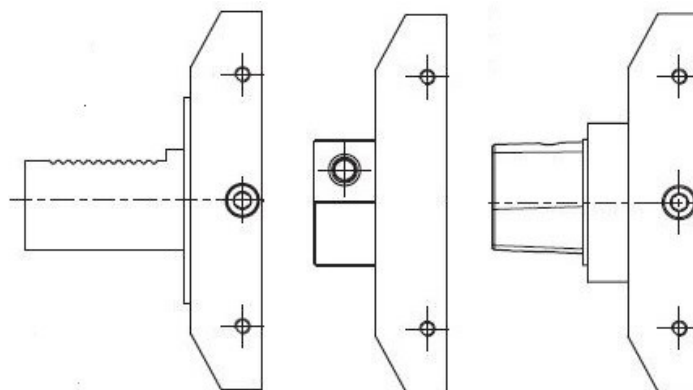
5.1. Upínací přípravky firmy Kistler

První součástí, kterou bylo potřeba navrhnout, byl jakýsi adaptér, díky němuž by těleso dynamometru bylo spolehlivě upevněno do revolverové hlavy soustruhu. Na obr. 13. můžeme vidět model adaptéru firmy Kistler vytvořený v programu Inventor.



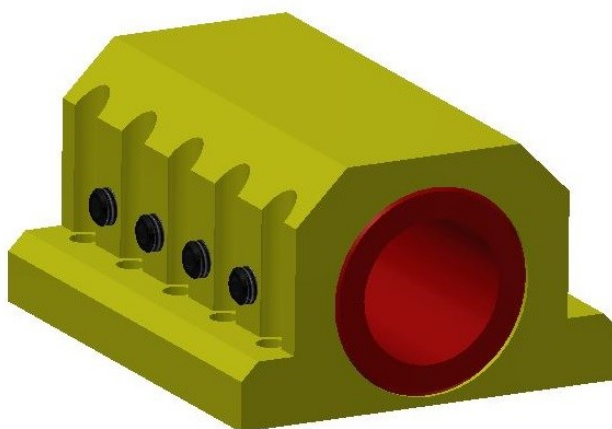
Obr. 13 – Adaptér firmy Kistler

Jedná se o model, který se od originálu může mírně lišit. Na zadní straně se nachází válcová část s hřebenových drážkováním o velikostech VDI 30, 40, 50, jež se vkládá do příslušné dutiny v revolverové hlavě. Na přední části se nachází 8 děr se závity M6, s jejichž pomocí se k adaptéru upevňuje dynamometr. Firma nabízí ještě další 2 typy adaptérů, jejichž schémata jsou zobrazena na obr. 14. Z obrázku je zřetelné, že přední část je ve všech 3 provedeních totožná, liší se pouze upínací část.



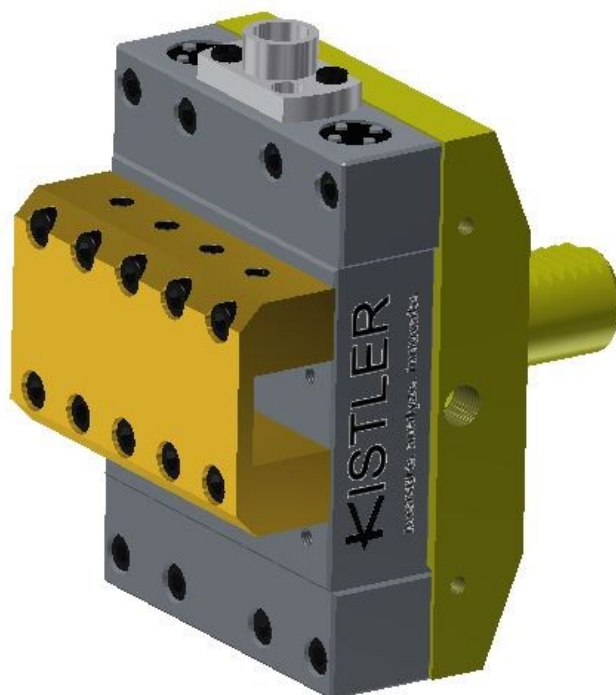
Obr. 14 – Typy adaptérů Kistler [14]

Další částí v celé sestavě adaptér-dynamometr-nůž je nástrojový držák. Ten přímo sousedí s přední částí dynamometru a udržuje nůž ve stálé poloze. Firma Kistler nabízí 2 typy nástrojových držáků. Jeden typ držáků je pro nože vnitřní, pomocí druhého typu se upínají soustružnické nože o čtvercovém průřezu. Součástí držáků pro vnitřní nože je také redukční vložka, díky které můžeme držák použít pro průměry nožů 40, 32, 25mm. Na straně uvedeného držáku jsou umístěny 4 aretační šrouby, s jejichž pomocí je zajištěna poloha soustružnického nože v nástrojovém držáku. Na obr. 15 můžeme vidět nástrojový držák pro vnitřní nůž firmy Kistler. Jelikož Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie nedisponuje nástrojovým držákem pro nože vnitřní, bude výkresová dokumentace rozšířena o výkresy tohoto přípravku. V bakalářské práci je zmíněný výkres uveden pod přílohou A.



Obr. 15 – Nástrojový držák s redukční vložkou pro vnitřní nůž

Pro nože o čtvercovém průřezu žádné redukční vložky bohužel neexistují. Nástrojový držák se proto dělá ve 2 provedeních a to pro normalizované průřezy nožů o délce hrany 25 a 20mm. Tento typ držáků společně s ostatními součástmi sestavy je vidět na obr. 16. Oba typy nástrojových držáků jsou upevněny k dynamometru pomocí 10 šroubů, polohu nože zajišťují 4 šrouby na vnější straně držáku.



Obr. 16 – Sestava s nástroj. držákem pro nože čtvercového průřezu

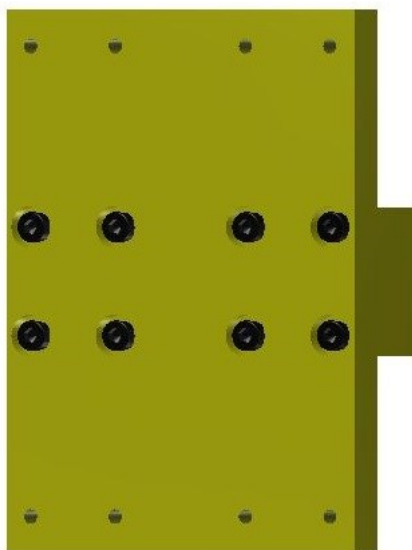
5.2. Upínací přípravky navržené katedrou

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, má v současné době k dispozici 2 upínací přípravky pro zmíněný dynamometr. Jeden z nich je navrhnut pro univerzální soustruh, druhý přípravek je určen pro soustružnicko-frézovací centrum DMG MORI NLX 2500MC/700, na kterém se realizovala i experimentální úloha. Tento přípravek lze použít i na jiných soustružnicko-frézovacích centrech se stejným systémem upínání nástrojů do revolverové hlavy. Modely jednotlivých přípravků lze vidět na obrázcích níže, kompletní výkresová dokumentace k těmto přípravkům je součástí bakalářské práce.

5.2.1. Přípravek pro nožové hlavy univerzálních soustruhů

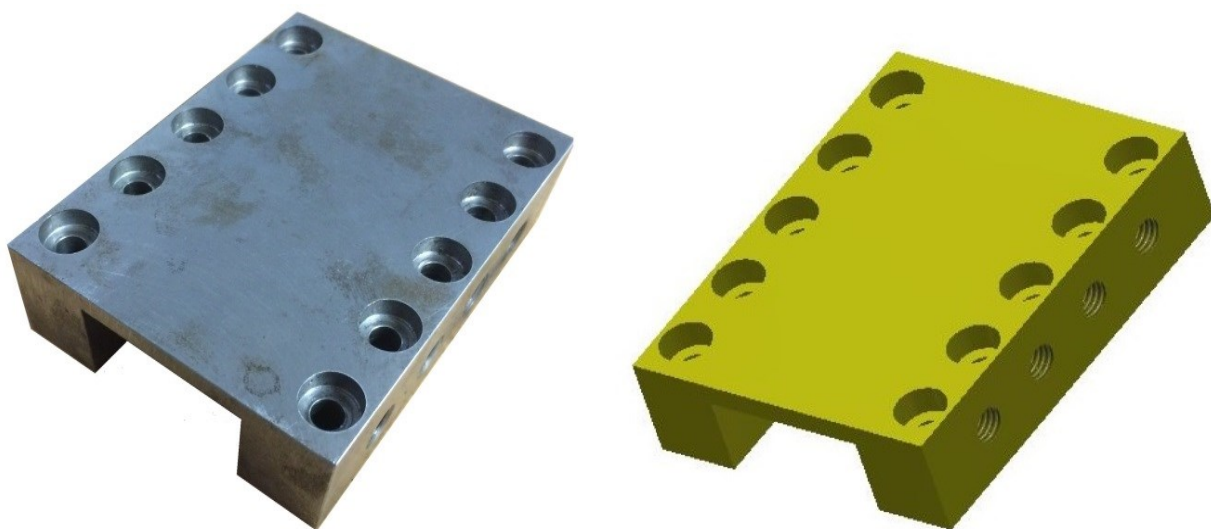
Jedná se o jednoduchý upínací přípravek, který je sestaven z několika komponent a následně je upnut do nožové hlavy soustruhu.

Zadní částí je kvádr, jenž slouží jako upínací část. Takto část se upíná do nožové hlavy soustruhu. Ke kvádru je pomocí 8 zapuštěných šroubů připevněna upínací deska. Takto smontovaná sestava (obr. 17) je připravená k uchycení dynamometru. Výkresová dokumentace této sestavy, viz příloha B.



Obr. 17 – Sestava zadní části

Přední částí je nástrojový držák, jehož reálné foto i model je zachycuje obr. 18. Jedná se o součást, která je uchycena přímo na tělese dynamometru. Drážka o rozměrech 40x20mm slouží pro upnutí soustružnického nože. Rozměry drážky jsou takto zvoleny záměrně. Souvisí to s rozmanitostí soustružnických nožů, které lze na konvenčních strojích použít. Pro docílení souososti špičky nože s osou obrobku, je nutné každý nůž vypodložit do jiné výšky. K zajištění polohy nože slouží 4 šrouby na boční hraně přípravku. Příloha B1 obsahuje výkresovou dokumentaci tohoto držáku.



Obr. 18 – Nástrojový držák

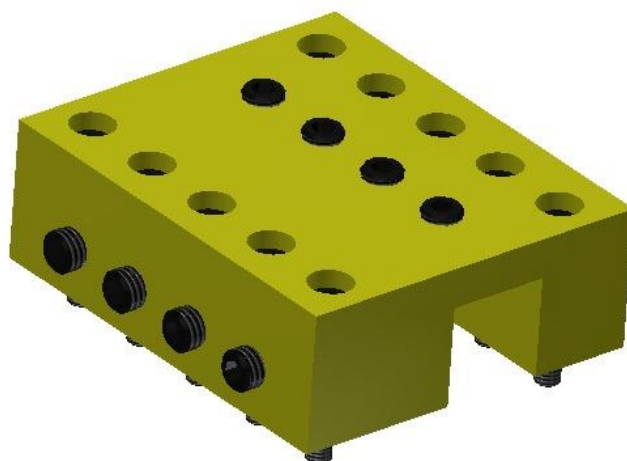
5.2.2. Přípravek pro DMG MORI NLX 2500MC/700

Navržený přípravek se svým uchycením do revolverové hlavy, zcela liší od originálních přípravků firmy Kistler. Zadní částí přípravku (obr. 19), která je připevněna k revolverové hlavě je jakési „elko“, s vyfrézovanými drážkami. Součástí této komponenty je i hliníková soustružená miska s drážkou po obvodu pro těsnící O-kroužek. Tato miska plní funkci „záslepky“ pohonu poháněného nástroje. O-kroužek by měl zamezit vniknutí chladicí kapaliny a jiných nečistot, do systému pohonu. Výhodou navrženého přípravku je vysoká tuhost celé soustavy a také možnost uchycení dynamometru, jak na kratší (vnější nůž), ale tak i delší vnější stranu přípravku (vnitřní nůž). Dynamometr je k přípravku uchycen pomocí 8 šroubů. Výkresová dokumentace, viz příloha C1.



Obr. 19 – Zadní část navrženého přípravku

Přední část navrženého přípravku je nástrojový držák (obr. 20). Ten je mírně odlišný od nástrojového držáku, pro univerzální soustruh. Rozměry musely být mírně pozměněny a to z důvodu, aby se špička nástroje setkala s osou obrábění obrobku. Soustružnický nůž není zajištěn proti nechtěnému pohybu pouze 4 šrouby v jedné ose, jako tomu je u originálního držáku Kistler i u držáku pro univerzální soustruh. Nýbrž je zajištěn 4 šrouby v ose X a dalšími 4 v ose Z. Tím je docíleno absolutního zajištění nože v nástrojovém držáku. Výkresová dokumentace je součástí bakalářské práce jako příloha C4.



Obr. 20 – Nástrojový držák navržený katedrou

6. Experiment

Experiment byl uskutečněn v dílně Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie na Fakultě strojní v Ostravě. Při měření složek řezné síly, bylo současně měřeno i opotřebení destičky, které provedl můj kolega Bc. Vojtěch Schreier. Některé jeho hodnoty byly následně použity v další kapitole pro zpracování grafů velikosti složek řezné síly v závislosti na opotřebení řezné hrany. Z teorie je známo, že i za konstantních podmínek obrábění okamžitá velikost řezné síly F_{ok} kolísá $\pm 20\%$. Toto kolísání je zapříčiněno nehomogenitou materiálu a mechanikou tvorby třísky. Z tohoto důvodu by se měření mělo vždy několikrát opakovat, aby se zajistila věrohodnost naměřených hodnot. To bohužel z časových, ale i finančních příčin nebylo možné.

6.1. Pomůcky použité při experimentu

6.1.1. Stroj

Experiment byl vykonán na soustružnicko-frézovacím centru DMG MORI NLX 2500MC/700 (obr. 21), jehož základní parametry jsou k vidění v tab. č. 2. Revolverová hlava byla osazena upínacím přípravkem pro měřicí zařízení zn. Kistler.



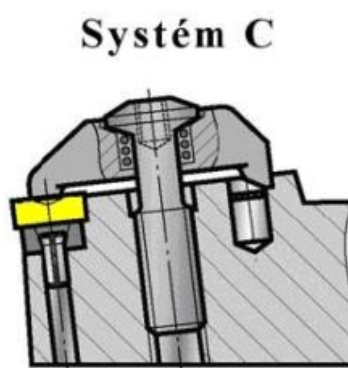
Obr. 21 – Použitý stroj

Tab. 2 – Parametry DMG MORI NLX 2500MC/700

Parametr	Hodnota
Oběžný průměr nad ložem	787 mm
Oběžný průměr nad suportem	541 mm
Max. průměr soustružení	366 mm
Maximální délka soustružení	705 mm
Pojezd v ose X	260 mm
Pojezd v ose Z	795 mm
Max. otáčky vřetena	4000 mm ⁻¹
Počet poloh (nástrojů)	12
Velikost nástroje (kvadrát)	25 mm
Čas indexování nástrojové hlavy	0,27 s
Rychloposuv v ose X a Z0	30 000 mm·min ⁻¹
Výkon vřetena stroje	18,5/18,5/15 kW
Hmotnost stroje	5 500 kg

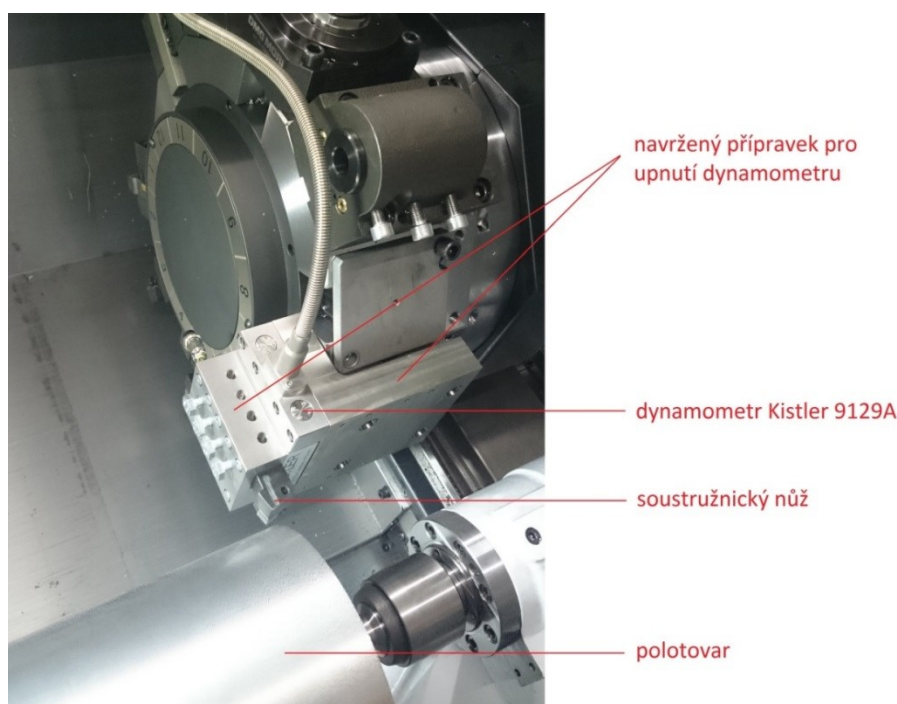
6.1.2. Nástroj a vyměnitelná břitová destička

Jako obráběcí nástroj byl použit pravý ubírací přímý nůž CERADEx XCSRNR2525M-1204SEN osazený destičkou typu SNUN 120408. Materiálem destičky je slinutý karbid dle ISO 513 – P20. Tento typ je vhodný pro obrábění oceli, austenitické oceli, nerezové oceli, litiny, neželezné kovy, žárupevné slitiny a pro oceli s pevností nad 1500 MPa. Lze jej také použít pro obrábění kalené oceli a tvrzené litiny. Destička se hodí pro střední řezné rychlosti. Typ upnutí destičky v nástrojovém držáku je viditelný na obr. 22.



Obr. 22 - Typ upnutí VBD [19]

Soustružnický nůž byl upevněn spolu s dynamometrem v upínacím přípravku, který byl následně upnut do revolverové hlavy, viz obr. 23.



Obr. 23 – Pohled na vnitřní prostor stroje před obráběním

6.1.3. Obrobek

Jako materiál polotovaru byl zvolen materiál, který je zároveň etalonem obrobitelnosti pro skupinu obrobitelnosti „b“ – oceli. Jedná se o normalizačně žíhanou ocel 12 050.1 (ČSN 41 2050.1), značení dle C60E4 ISO 683-1-87. Mechanické vlastnosti a chemické složení popisují tabulky č. 3, 4.

Tab. 3 – Mechanické vlastnosti použitého materiálu

Ocel 12 050.1	Značka	Hodnota	Jednotky
Mez kluzu	$R_{P0,2}$	Min. 325	MPa
Mez pevnosti	R_m	Min. 540	MPa
Tažnost	A_5	Min. 17	%
Tvrдость	-	Max. 225	HB
Kontrakce	Z	-	%
Modul pružnosti v tahu	E	211	GPa
Modul pružnosti ve smyku	G	79	GPa

Tab. 4 – Chemické složení v %

Ocel 12 050.1	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
Dle ČSN 41 2050	0,42 0,50	0,50 0,80	0,17 0,37	Max. 0,25	Max. 0,30	Max. 0,30	Max. 0,040	Max. 0,040

Polotovaru byl ve formě tyče válcované za tepla o výchozím Ø 200mm a jmenovité délce 500mm. Po navrtání středícího důlku (obr. 24) byl polotovaru upnut do sklíčidla soustruhu a zároveň podepřen hrotem koníku. Následně byl proveden zarovnávací řez na výchozí Ø 197mm do délky 450mm. Další fází obrábění byl pak samotný experiment.



Obr. 24 – Příprava polotovaru

6.1.4. Dynamometr Kistler 9129A

Viz kapitola 4. – Dynamometr Kistler 9129A

7. Průběh experimentu

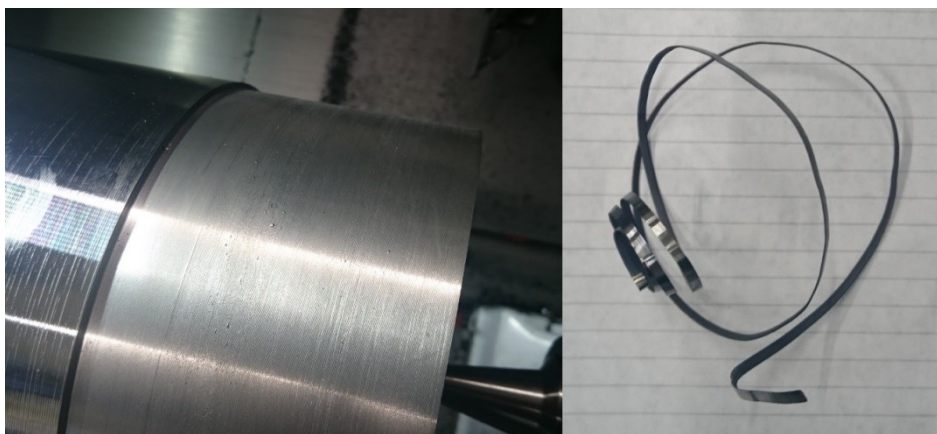
Experiment byl založen na podélném soustružení polotovaru do určité délky. S každým dalším řezem se soustružená délka zmenšovala a to z důvodu záběru VBD. Kdyby byla soustružená délka zůstávala stejná, destička by ke konci řezu odebírala materiál stále větší částí řezné hrany, což je nepřípustné. Vyložení soustružnického nože bylo 34,4mm. Řezné podmínky jsou zřejmé z tab. č. 5. Experiment byl realizován pro 4 řezné rychlosti $v_c=100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $v_c=125 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $v_c=160 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $v_c=200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. U jednotlivých řezných rychlostí byl uskutečněn vždy takový počet řezů, pokud se opotřebení destičky nedostalo na požadované kritérium. V jednom případě se destička zlomila ještě před dosažením nejvyšší přípustné šířky opotřebení, což znamenalo předčasný konec obrábění danou řeznou rychlostí. Následovalo otočení destičky, změna řezné rychlosti a nové měření. Během každého jednotlivého řezu byla provedena 3 měření složek řezné síly dynamometrem. Každé měření mělo délku trvání 30 sekund. První měření bylo započato před nájezdem nože do materiálu, druhé bylo spuštěno v polovině obrábění a poslední třetí měření bylo zapnuto ke konci obrábění.

Tab. 5 – Řezné podmínky při soustružení

Řezné podmínky	Značka	Hodnota	Jednotky
Řezná rychlost	v_c	-	$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$
Posuv	f	0,25	mm
Hloubka řezu	a_p	2	mm

7.1. Obrábění řeznou rychlostí $v_c=100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

Už při prvním řezu touto rychlostí se vyskytly určité komplikace. Problémem bylo utváření třísky, která se zamotávala kolem nože. Proto byl tento řez po obrobené délce $l=89,15\text{mm}$ zastaven. Ukázku vytvořené třísky i obrobeného povrchu je možné vidět na obr. 26. Jak je viditelné z obrázku, kvalita obrobeného povrchu není příliš dobrá, na povrchu byly utvořeny zbytky nárůstků. Tvar třísky bych definoval jako pásový-stočený, což je nežádoucí.



Obr. 26 – Ukázka povrchu a třísky po prvním řezu

První řez, který musel být nečekaně zastaven, byl započat znovu při stejných podmínkách obrábění. Tvar třísky se změnil na obloukovou-spojenou a obrábění danou rychlostí dále pokračovalo bez problémů. Doba řezání touto řeznou rychlostí činila 136,6 min. Naměřené hodnoty velikosti sil jsou zobrazeny v tab. č. 6. Jedná se o průměrné hodnoty jednotlivých složek řezné síly, které byly analyzovány softwarem Dynoware. Výsledná síla byla z těchto hodnot následně vypočtena.

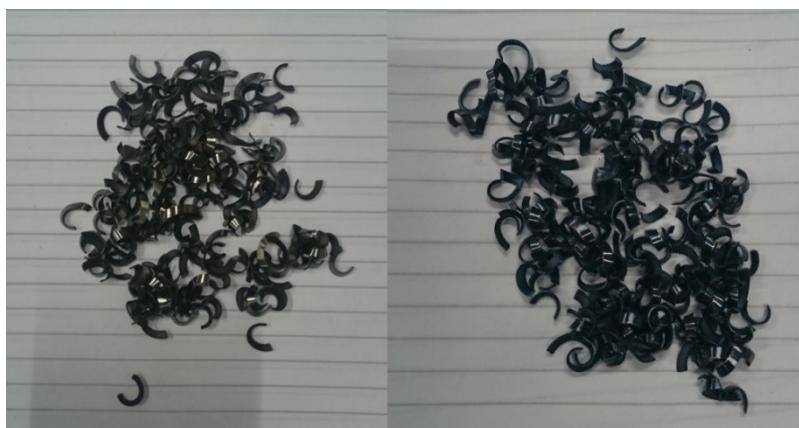
Tab. 6 – $v_c=100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f=0,25 \text{ mm}$, $a_p=2 \text{ mm}$

Řez	t [min]	VB_{Bmax} [mm]	F_f [N]	F_p [N]	F_c [N]	F [N]
1.	2,16	0,06	365,6	1 169,0	841,6	1 486,1
2.	10,42	0,06	384,2	1 207,0	862,0	1 532,2
3.	20,70	0,13	402,5	1 231,0	867,6	1 558,9
4.	30,71	0,17	416,1	1 242,0	878,0	1 576,9
5.	40,53	0,18	422,3	1 258,0	894,9	1 600,6
6.	59,23	0,19	429,0	1 295,0	916,2	1 643,3
7.	76,97	0,25	423,2	1 281,0	892,3	1 617,5
8.	93,75	0,28	438,3	1 318,0	929,6	1 671,3
9.	109,58	0,29	439,0	1 346,0	928,3	1 693,0
10.	123,52	0,33	442,2	1 369,0	923,7	1 709,7
11.	136,64	0,36	449,7	1 354,0	904,1	1 689,1

7.2. Obrábění řeznou rychlostí $v_c = 125 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Obrábění řeznou rychlostí $125 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ bylo klidné a bezproblémové. Bylo provedeno 17 řezů při celkovém trvání 92,4 min. Tvar třísek byl opět obloukový-drobivý a nijak zásadně se během obrábění nezměnil. Změnilo se pouze zbarvení třísek (obr. 27), což

poukazuje na změnu teploty během obrábění. V tabulce č. 7 jsou zobrazeny naměřené hodnoty řezné síly.



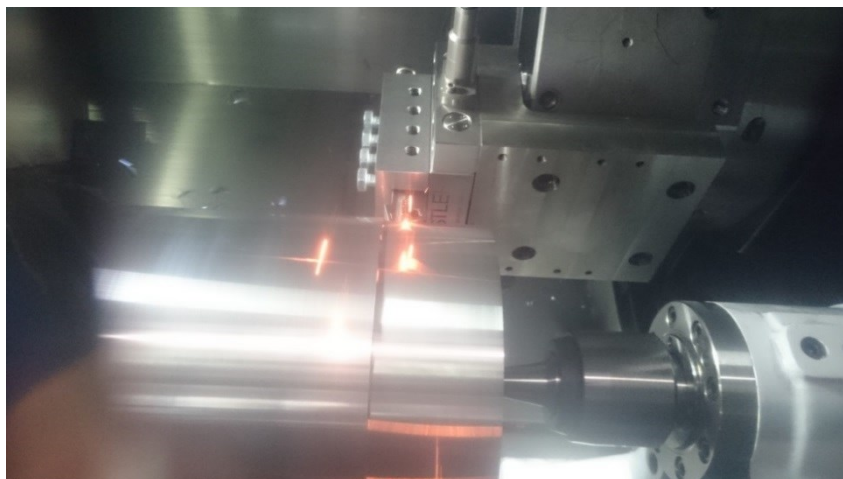
Obr. 27 – Ukázka třísek po 1. řezu (vlevo) a po řezu 17. (vpravo)

Tab. 7 – $v_c=125 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f=0,25 \text{ mm}$, $a_p=2 \text{ mm}$

Řez	t [min]	VB_{Bmax} [mm]	F_f [N]	F_p [N]	F_c [N]	F [N]
1.	4,65	0,07	372,8	1 138,0	745,3	1 410,5
2.	11,79	0,10	396,3	1 190,0	816,1	1 496,4
3.	18,78	0,13	409,6	1 221,0	754,9	1 492,8
4.	25,57	0,14	428,6	1 300,0	900,9	1 638,7
5.	32,16	0,17	436,5	1 267,0	885,5	1 606,2
6.	38,14	0,17	440,4	1 296,0	885,6	1 630,3
7.	43,94	0,18	455,2	1 334,0	932,3	1 690,0
8.	49,57	0,19	457,3	1 354,0	941,5	1 711,4
9.	55,00	0,22	464,8	1 361,0	948,9	1 723,0
10.	60,27	0,22	482,2	1 368,0	972,9	1 746,6
11.	65,38	0,23	499,9	1 411,0	1 007,0	1 804,1
12.	70,32	0,28	493,3	1 411,0	1 002,0	1 799,5
13.	75,07	0,29	498,0	1 433,0	1 012,0	1 823,6
14.	79,65	0,31	509,2	1 429,0	1 028,0	1 832,5
15.	84,05	0,32	512,6	1 468,0	1 066,0	1 885,2
16.	88,30	0,34	517,1	1 467,0	1 054,0	1 878,9
17.	92,37	0,38	518,2	1 467,0	1 066,0	1 886,0

7.3. Obrábění řeznou rychlostí $v_c=160 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Při obrábění touto řeznou rychlostí obrobila destička neúplných 8 řezů. Hned po zasetí nástroje do materiálu začali z obroku odletovat žhavé třísky (obr. 28). Tento jev později odezněl. Tvar třísek byl víceméně totožný jako při obrábění řeznou rychlostí $125 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.



Obr. 28 – Průběh prvního řezu

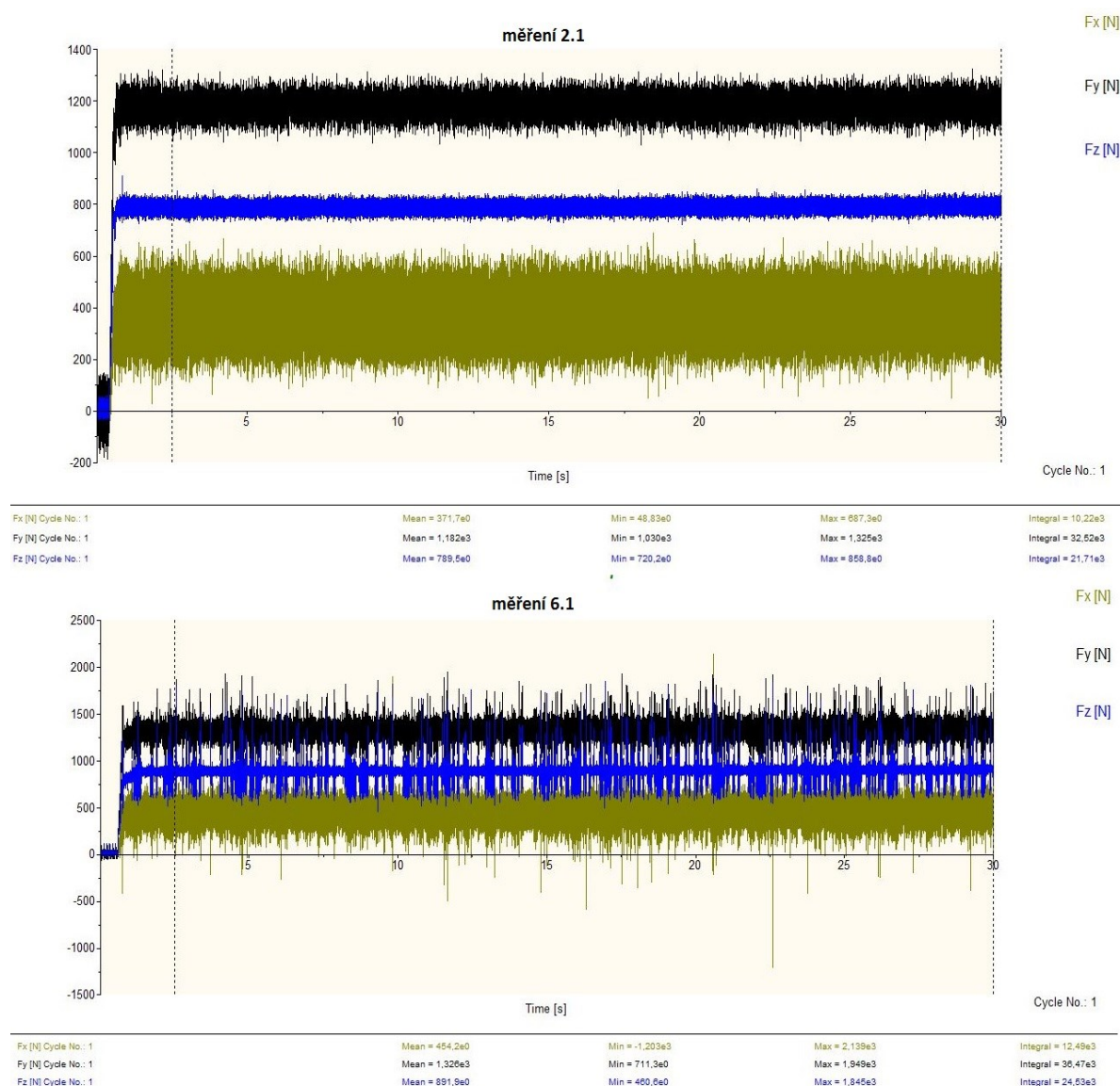
V tabulce č. 8 jsou zobrazeny naměřené hodnoty složek řezné síly. Z tabulky je zřejmé, že se velikost jednotlivých složek postupně zvyšovala, což je zapříčiněno otupením nástroje. Za povšimnutí stojí fakt, že při počátečním řezu byly naměřené hodnoty složek řezné síly jedny z nejnižších, při posledním řezu byly hodnoty pro změnu nejvyšší ze všech měřených řezných rychlostí a to i přes fakt, že opotřebení nástroje nebylo zdaleka tak velké, jako při ostatních řezných rychlostech. Při řezu č. 8 se řezná hrana destičky ulomila po obrobení délky 165mm. Bohužel v daném okamžiku nebylo zapnuté měření sil, tudíž nemůžeme vidět silové působení v momentě prasknutí destičky.

Tab. 8 – $v_c=160 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f=0,25 \text{ mm}$, $a_p=2 \text{ mm}$

Řez	t [min]	VB_{Bmax} [mm]	F_t [N]	F_p [N]	F_c [N]	F [N]
1.	7,09	0,13	327,2	1 120,0	751,3	1 387,8
2.	13,77	0,13	384,7	1 211,0	816,8	1 510,5
3.	20,30	0,18	422,1	1 310,0	902,5	1 645,8
4.	26,68	0,19	450,9	1 297,0	908,5	1 646,5
5.	32,91	0,24	458,5	1 319,0	900,1	1 661,4
6.	38,98	0,25	483,0	1 392,0	964,0	1 760,8
7.	44,89	0,26	515,7	1 425,0	1 028,0	1 831,2
8.	47,03	-	542,3	1 514,0	1 102,0	1 949,5

7.4. Obrábění řeznou rychlostí $v_c=200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Průměrná velikost řezných sil nebyla u této řezné rychlosti zdaleka největší, avšak rozptyl naměřených hodnot byl značný. Na obr. 29 je vidět, záznam z měření sil v softwaru Dynoware při 2. a 6. řezu. V tab. č. 9 jsou zobrazeny minimální a maximální naměřené hodnoty při těchto řezech. Při všech předešlých měřeních zůstával rozptyl hodnot podobný jak na začátku, tak i na konci měření. U této řezné rychlosti je, ale situace jiná. Na obr. 30 je zobrazen graf rozptylu radiální složky řezné síly. Rozptyl naměřených hodnot ke konci měření je tak velký, že průměrné hodnoty složek řezné síly v tabulce č. 10 spíše informativního charakteru. Tyto výkyvy mohli být způsobené rozkmitem soustavy stroj-nástroj-obrobek nebo rozkmitem samotného dynamometru, jelikož se jedná o pružný člen soustavy. Tento jev by mohl být předmětem dalšího zkoumání. Například při řešení diplomové práce.

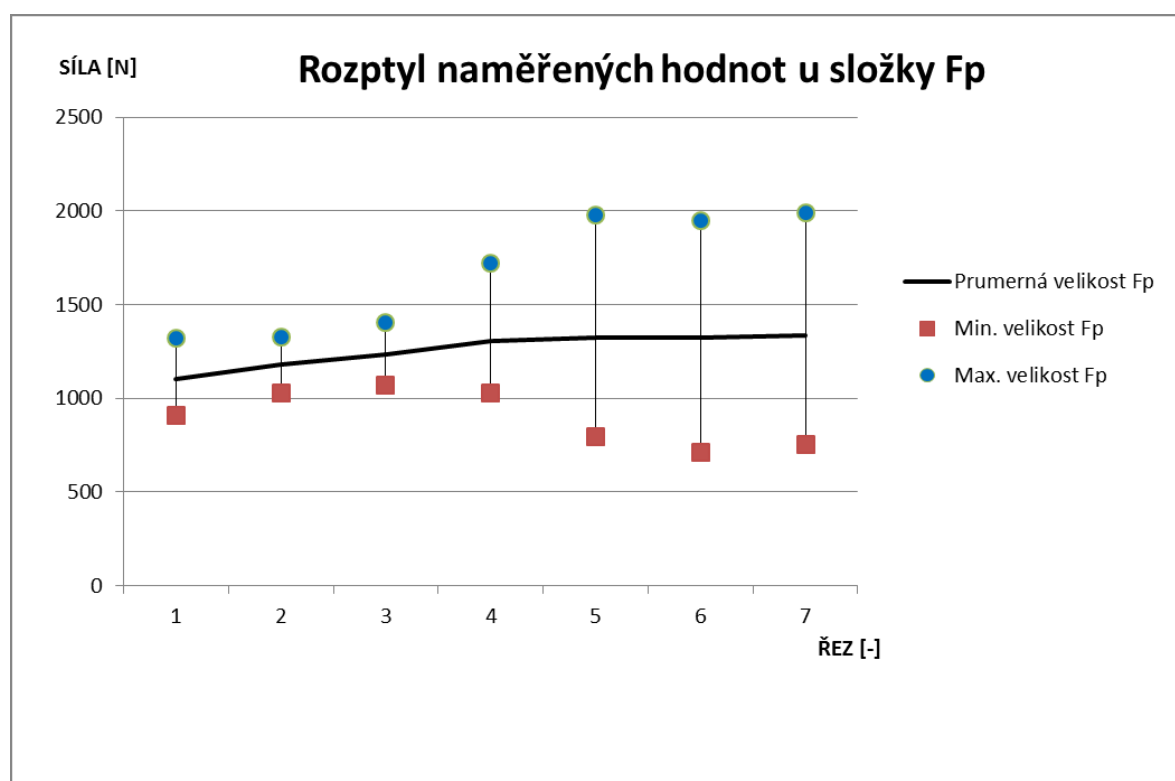


Obr. 29 – Záznam softwaru Dynoware

Tab. 9 – Naměřené hodnoty

Řez	F_f		F_p		F_c	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
2.	48,8	687,3	1 030,0	1 325,0	720,2	858,8
6.	-1 203,0	2 139,0	711,3	1 949,0	460,6	1 845,0

*číselné údaje jsou v [N]

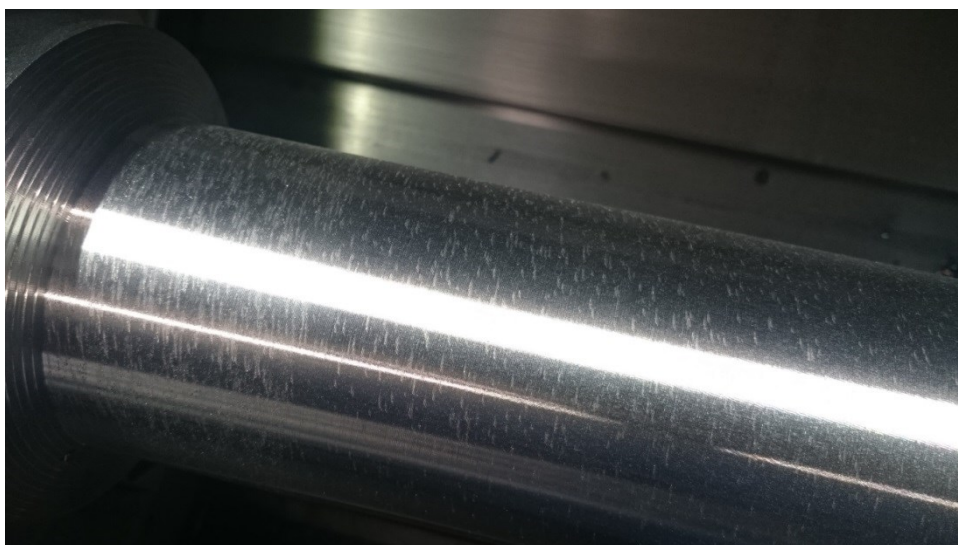


Obr. 30 – Graf rozptylu radiální složky řezné síly

Tab. 10 – $v_c=200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f=0,25 \text{ mm}$, $a_p=2 \text{ mm}$

Řez	t [min]	$VB_{B\max}$ [mm]	F_f [N]	F_p [N]	F_c [N]	F [N]
1.	3,17	0,12	343,8	1 102,0	722,3	1 361,7
2.	6,22	0,16	371,7	1 182,0	789,5	1 469,1
3.	11,93	0,23	407,1	1 237,0	842,8	1 551,2
4.	17,41	0,24	433,6	1 308,0	893,4	1 642,3
5.	20,06	0,32	456,5	1 326,0	903,8	1 668,4
6.	22,60	0,35	454,0	1 325,0	891,1	1 660,1
7.	25,04	0,35	476,1	1 333,0	913,2	1 684,5

Kvalita povrchu se po každém provedeném řezu rapidně zhoršovala. Na povrchu se objevovaly pravidelné zbytky nárůstků, tento jev je zobrazen na obr. 31. Tvar třísek byl opět obloukový-drobivý a po celou dobu obrábění se nezměnil.



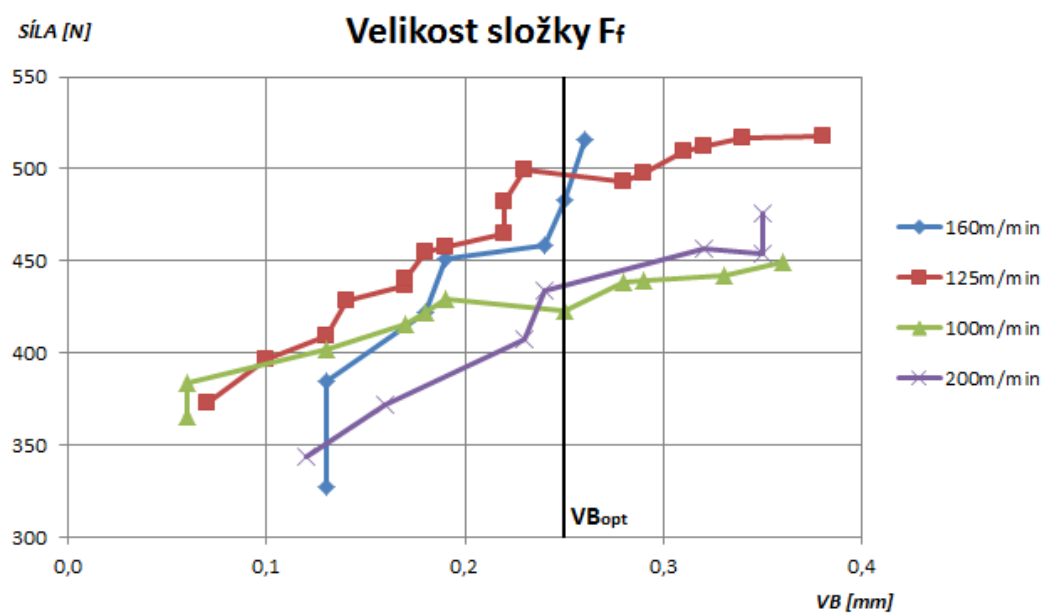
Obr. 31 – Ukázka povrchu po posledním řezu

8. Shrnutí silového působení

Na základě zvolené míry opotřebení hřbetu $VB_{opt}=0,25\text{mm}$ byly vypočteny hodnoty trvanlivosti pro každou řeznou rychlost. Tyto hodnoty trvanlivosti byly převzaty z diplomové práce Bc. Vojtěcha Schreiera a jsou zobrazeny v tab. 11. Na obr. 32 je graf velikosti axiální složky řezné síly, v závislosti na opotřebení hřbetu nástroje. Podklady pro následující grafy byly získány z průměrných velikostí sil při měření, viz tab. č. 6, 7, 8, 10. Z grafu je zřejmé, že při řezné rychlosti $160\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ je nárůst axiální složky řezné síly v závislosti na opotřebení hřbetu nástroje nejstrmější. Nejnižší velikost axiální složky řezné síly byla naměřena při zvoleném optimálním opotřebení hřbetu nástroje u $v_c=100\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, nejvyšší zase u $v_c=125\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.

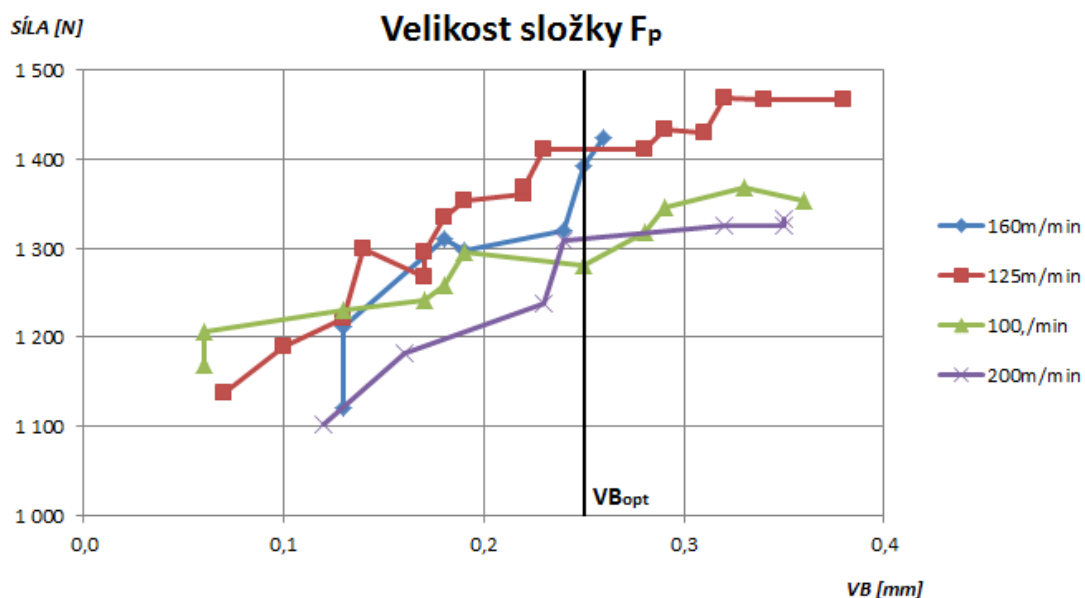
Tab. 11 - Hodnoty trvanlivosti nástroje při $VB_{opt}=0,25\text{mm}$

Řezná rychlost [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	T [min]
100	109,5
125	72,7
160	44,8
200	19,2



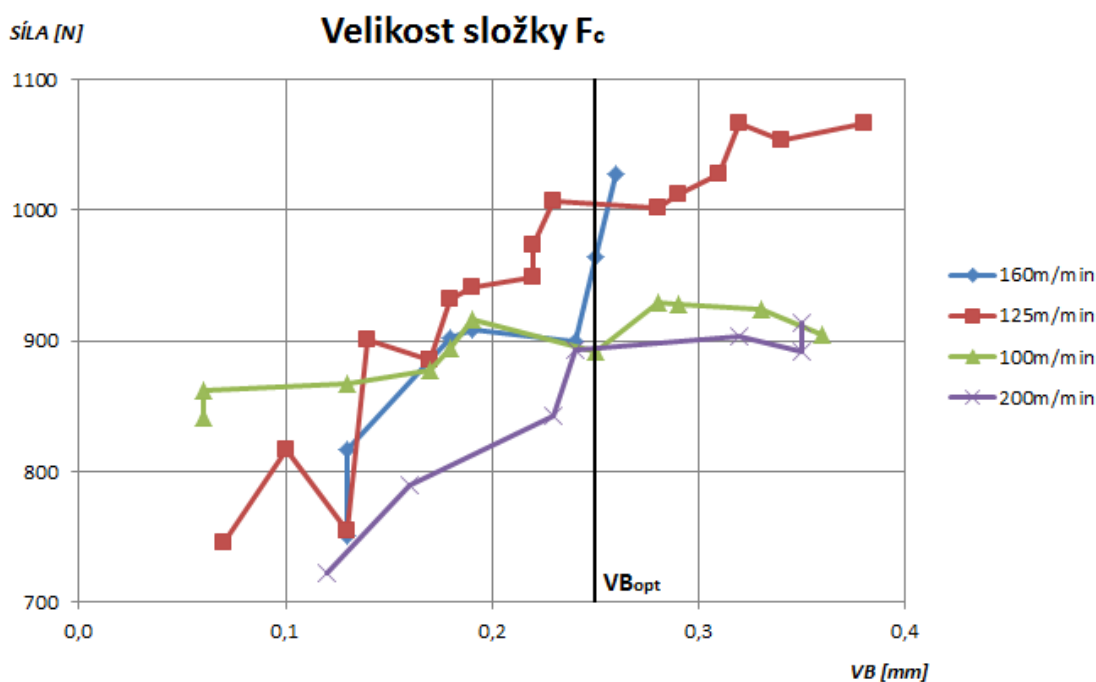
Obr. 32 – Velikosti axiální složky řezné síly

Na obr. 33 je k vidění graf velikosti radiální složky řezné síly. Nejnižších dosažených velikostí složky radiální řezné síly po prvním řezu bylo dosaženo u řezné rychlosti 200 $m \cdot min^{-1}$. Při srovnání velikosti axiální složky řezné síly s velikostí radiální složky řezné síly je z grafů vidět, že radiální složka je přibližně trojnásobně větší vůči složce axiální.



Obr. 33 - Velikosti radiální složky řezné síly

Graf na obr. 34 zobrazuje velikosti tangenciální složky řezné síly. Při třetím a pátém měřeném řezu u řezné síly $125 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, hodnota velikosti složky řezné síly mírně klesla. Dále už vývoj pokračoval přímo úměrně opotřebení, tzn. s větším opotřebením, rostla velikost řezné síly. Tento pokles byl pravděpodobně způsoben nepřesností měření. Stejně jako u předchozího grafu při srovnání složek řezné síly axiální vůči tangenciální, se velikost tangenciální složky řezné síly rovná zhruba dvojnásobku axiální složky.

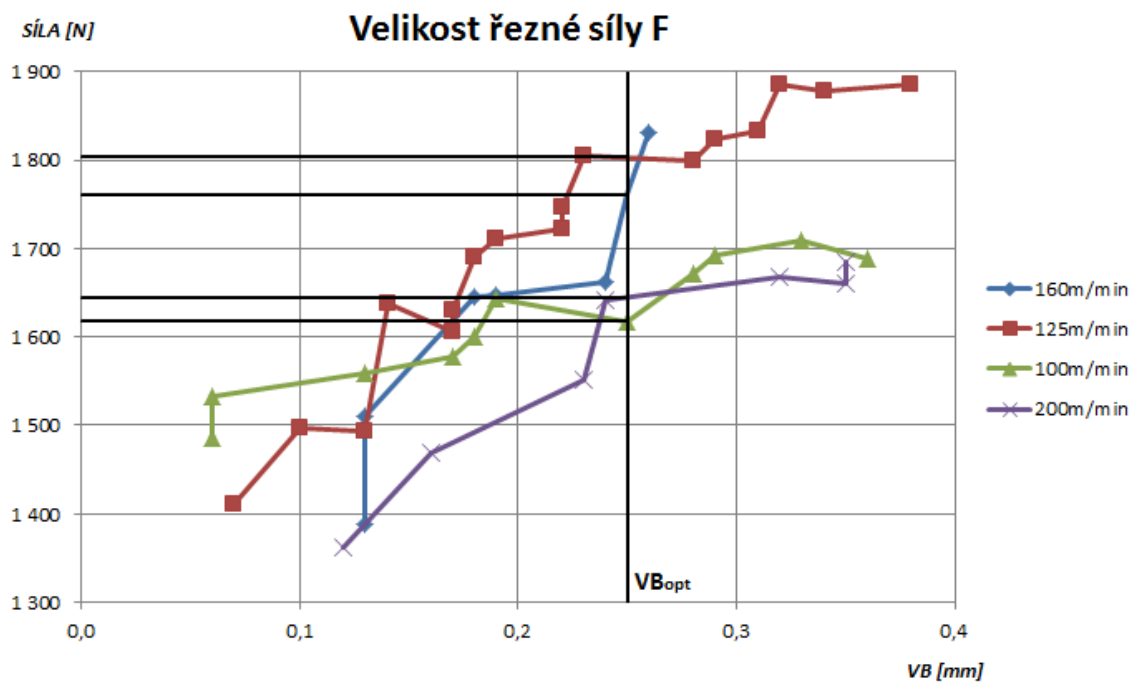


Obr. 34 - Velikosti tangenciální složky řezné síly

Graf na obr. 35 zobrazuje velikost celkové řezné síly. Z grafu je patrné, že při zvoleném optimálním opotřebení nástroje, byla nejvýhodnější volbou s ohledem na velikost řezných sil $v_c=100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, druhá byla $v_c=200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, třetí $v_c=160 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a poslední místo zůstalo pro $v_c=125 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Konkrétní hodnoty řezné síly při $VB_{\text{opt}}=0,25\text{mm}$ jsou zobrazeny v tab. 12.

Tab. 12 – Vypočtené hodnoty řezné síly při $VB_{\text{opt}}=0,25\text{mm}$

Řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	Velikost řezné síly [N]
100	1617,5
125	1803,0
160	1760,5
200	1645,0



Obr. 35 – Velikosti výsledné řezné síly

Z výsledků, které bylo možné porovnávat a analyzovat je patrný fakt, že trend velikosti složek řezné síly má vzrůstající charakter, vzhledem ke zvyšující se řezné rychlosti. Avšak ten je zastaven na hranici řezné rychlosti rovnající se $160 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Při této řezné rychlosti dochází ke zlomu trendu, s dále zvyšující se řeznou rychlostí řezná síla, případně velikosti jejich složek klesají.

Závěr

Bakalářská práce se zabývala návrhem upínacích přípravků pro dynamometr Kistler 9129A. Jistým doplňkem bylo také ověření funkčnosti dynamometru a následné porovnání velikosti sil a opotřebení při jednotlivých řezných rychlostech.

Teoretická část byla zaměřena na rozbor problematiky sil, možnosti měření řezné síly a popisem jednotlivých měřících zařízení. V další kapitole je popsán princip piezoelektrického jevu, včetně piezoelektrických materiálů. Následující kapitola pojednává o měřícím zařízení Kistler 9129A. Taktéž jsou zde popsány jeho rozměry, možnosti použití, technická data a další informace týkající se jeho používání. Další kapitolou bylo navrhnutí upínacích přípravků pro použitý dynamometr firmy Kistler. V této kapitole byly představeny originální upínací přípravky této firmy. Z technických údajů a informací získaných prostřednictvím katedry a veřejně dostupných elektronických publikací byly zpracovány návrhy jak adaptérů, tak i nástrojových držáků pro strojové vybavení katedry. Výkresová dokumentace k navrženým přípravkům je přílohou bakalářské práce.

Praktická část se zabývá ověřením funkčnosti měřícího zařízení. Experiment probíhal v laboratořích katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie a byl uskutečněn na soustružnicko-frézovacím centru DMG MORI NLX2500/700. Nezbytnou součástí byl dynamometr Kistler, který byl upnut do revolverové hlavy stroje pomocí navrženého upínacího přípravku. Experimentem bylo podélné soustružení referenčního materiálu 12 050.1 při různých řezných rychlostech (100; 125; 160; 200 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$) za konstantní hloubky řezu (2 mm) a posuvu (0,25 mm). Při jednotlivých řezech bylo provedeno vždy několik měření, z nichž byly pomocí softwaru Dynoware zaznamenávány a posléze analyzovány velikosti řezných sil. Hodnoty opotřebení nástroje byly převzaty z diplomové práce Bc. Vojtěcha Schreiera, který se rovněž podílel na experimentu. Řezné rychlosti 160 i 200 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ byly z hlediska velikosti řezné síly, trvanlivosti destičky a průběhu obrábění špatnou volbou. Řezná síla 100 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ byla z hlediska velikosti složek řezné síly a opotřebení hřbetu nástroje, trvanlivosti i celkové doby řezání nejvhodnější volbou. Druhá v pořadí by byla $v_c=125 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a to i přes nejvyšší naměřené hodnoty složek řezné síly v průběhu obrábění.

Z grafů v závěrečné části vyplývá, že řezná rychlost má výrazný vliv na velikost složek řezné síly. Byl také potvrzen fakt zmíněný v teoretické části a tím je, že velikost jednotlivých složek řezné síly není po celou dobu obrábění stejná. Nýbrž se zvětšujícím se opotřebením řezná síla roste. Nově zakoupený dynamometr Kistler, jímž se práce zabývala, bude nadále používán při výzkumu i experimentálních měřeních na Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie.

Citace

- [1] Příručka pro technology – Jak je to s řeznými silami?. Mmspektrum. [online]. © 2016 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami.html>
- [2] Piezo-ceramic Sensors and Sensor Applications. Ceramtec. [online]. 2015 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.com/applications/piezo-applications/sensor-technology>
- [3] Odporové tenzometry. Homel.vsb. [online]. 2015 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~jur286/mast/tenzometry.htm>
- [4] Tenzometry. Vtsz. [online]. © 2016 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.vtsz.cz/polovodicove-tenzometry.php>
- [5] Měření složek síly řezání. Homel.vsb. [online]. 2011 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_08.pdf
- [6] Cutting force measurement. M3.tuc. [online]. ©2009 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.m3.tuc.gr/EQUIPMENT/MIKRODYNAMOMETRO/cutting%20force%20measurement.pdf>
- [7] Piezoelectric Materials. Thegreenage. [online]. 2013 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.thegreenage.co.uk/tech/piezoelectric-materials/>
- [8] Síla bude změřena. Mmspektrum. [online]. © 2016 [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/sila-bude-zmerena.html>
- [9] Řezné síly při soustružení. Coptel. [online]. 2011 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/?action=2&doc=32840&docGroup=4931&cmd=0&instance=2>
- [10] Nové směry v progresivním obrábění [online]. 2007. [cit. 2016-04-14]. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>
- [11] Piezoeletrický jev. Wikipedia. [online]. 2016 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Piezoelektrick%C3%BD_jev
- [12] Přímé měření sil a momentů. Homel.vsb. [online]. 2011 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_09.pdf

- [13] Analyzing and Commanding Sophisticated Machining Processes.. Kistler. [online]. 2015 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=65&model=download>.
- [14] 3-Component Measuring System. Web.sensor. [online]. ©2009 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://web.sensor-ic.com:8000/ZLXIAZAI/KISTLER/000-710e-04.11.pdf>
- [15] NESLUŠAN M., TUREK S., BRYCHTA J., ČEP R., TABAČEK M., Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní. Žilina: EDIS Žilina, 2007, ISBN 978-80-8070-711-8
- [16] HUNT, Andy. Guide to the measurement of force. London, 1998. ISBN 09-044-5728-1
- [17] Elektronické publikace ze školení poskytnuté firmou Kistler (více nespecifikováno)
- [18] Tenkovrstvé piezoelektrické senzory. Fchi. [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/14_senzory_QCM.pdf
- [19] Základy soustružení-vnější a vnitřní plochy. Slideplayer. [online]. 2015 [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2768829/>
- [20] Základy piezoelektřiny pro aplikace. Crr.vutbr. [online]. 2011 [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1112.pdf

Seznam příloh

Příloha A	Výkres sestavy: Držák vnitřního nože
Příloha A1	Výrobní výkres: Držák vnitřního nože
Příloha A2	Výrobní výkres: Redukční vložka 40-32
Příloha B	Výkres sestavy: Upínací přípravek – uni. soustruh
Příloha B1	Zadní část - univerzální soustruh
Příloha B2	Výrobní výkres: Nástrojový držák-univerzální soustruh
Příloha B3	Výrobní výkres: Upínací deska
Příloha B4	Výrobní výkres: Upínací část
Příloha C	Výkres sestavy: Upínací přípravek – CNC
Příloha C1	Výkres podsestavy: Zadní část – CNC
Příloha C2	Výrobní výkres: Zadní část – CNC
Příloha C3	Výrobní výkres: Těsnící miska
Příloha C4	Výrobní výkres: Nástrojový držák - CNC